



Université du Québec
à Chicoutimi

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

Pour l'obtention du grade de maîtrise en science appliquées

(M. Sc. A.)

PAR

SARAH-EVE TREMBLAY

**DÉVELOPPEMENT D'UN MONTAGE SIMULANT L'ÉROSION PAR LA
PLUIE POUR L'ÉVALUATION DES REVÊTEMENTS GLACIOPHOBES DANS
LE DOMAINE AÉROSPATIAL**

JUILLET 2017

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente le développement d'un montage simulant l'érosion par la pluie afin d'effectuer l'évaluation de différents revêtements glaciophobes dans le domaine aérospatial. Bien que plusieurs revêtements présentent une bonne efficacité à réduire l'adhérence et/ou l'accumulation de glace, ils ne répondent pas nécessairement aux normes de résistance à l'érosion simulée par les gouttes de pluie les frappant à grande vitesse.

Il n'existe qu'une installation en Amérique du Nord offrant un service d'essai qui évalue la résistance à l'érosion par la pluie suivant les normes aérospatiales. Étant l'unique institution pouvant faire la certification de peintures utilisées sur les avions en ce qui a trait à l'érosion par la pluie, ce service est donc difficile d'accès et coûteux. Le laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA) a développé un essai plus rapide et moins coûteux, facilitant ainsi le développement de revêtements glaciophobes devant résister à l'érosion par la pluie.

Dans cette étude, le développement du montage d'érosion par la pluie effectué au laboratoire des matériaux antigivre (LIMA) est présenté. En particulier, des essais sur quatre (4) revêtements dont la résistance à l'érosion est connue, et sur trois revêtements industriels, ont été effectués afin d'ajuster les différents paramètres du montage comme la pression et la température de l'eau ainsi que la robustesse du montage. Ensuite, des essais de sensibilité et de reproductibilité des résultats ont également été effectués pour fin de validation du montage et du protocole expérimental.

Pour ce faire, le montage de type jet d'eau développé consiste principalement en une pompe à haute pression qui projette un jet d'eau continu passant par les orifices d'un disque tournant. Cette opération permet de générer une goutte de pluie simulée qui est projetée sur un échantillon de revêtement statique. L'essai est basé sur la norme standard ASTM (*Liquid Impingement Erosion Testing, G73-82*). La résistance à l'érosion du matériau est déterminée à l'aide du nombre d'impacts subi par l'échantillon obtenu avant la production de dommages visibles. Donc, pour déterminer le niveau d'érosion, quatre sites d'impacts doivent être érodés sur cinq sur le même rang pour le même nombre d'impact.

L'analyse des quatre revêtements de résistance à l'érosion connus a été complétée par l'examen microscopique de chaque site d'impact et d'une photo. Le choix des quatre revêtements de résistance à l'érosion connue, allant du plus résistant au moins résistant, a permis de vérifier que le montage était assez sensible pour évaluer les revêtements souvent utilisés dans le domaine aérospatial. De plus, l'évaluation des trois revêtements industriels a permis, pour sa part, de confirmer les résultats obtenus précédemment.

Finalement, pour évaluer la sensibilité et la reproductibilité des résultats, de deux à six répétitions pour chaque revêtement a été effectuées donnant des taux d'érosion allant de 100 à 100 000 impacts. L'intervalle des écarts-types varie de $\pm 0\%$ à $\pm 47\%$ pour une moyenne de $\pm 17\%$. Le critère d'échec a été déterminé à l'aide du nombre d'impacts avant l'apparition de dommage visible ainsi que de la répétabilité des résultats.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, le professeur Jean Perron, pour m'avoir permis de travailler au sien du laboratoire le LIMA. Grâce à cette expérience, j'ai approfondi mes connaissances. Je le remercie pour m'avoir fourni un support moral et technique tout au long de mes travaux. Il m'a permis de découvrir le monde de l'ingénierie ainsi que le domaine aérospatial.

Je tiens également à remercier ma codirectrice, la docteur Caroline Laforte qui, tout au long de mes travaux de recherche, m'a soutenue et encadrée afin que je puisse atteindre mes objectifs. C'est grâce à ces encouragements qu'aujourd'hui je peux être fière d'avoir atteint mes buts. Je la remercie pour sa disponibilité ainsi que les réponses à mes multiples inquiétudes.

De plus, je tiens à remercier tout le personnel du LIMA pour sa coopération. Je remercie spécialement mes collègues Martin Truchon ainsi que Carol Mercier pour m'avoir accompagnée tout au long de mes travaux pour le développement du logiciel de contrôle ainsi que la fabrication du montage d'érosion. Sans leur support, le projet n'aurait pu être complété. Merci à mes collègues et amis Frédéric et Jean-Denis d'avoir su répondre à toutes mes nombreuses questions.

Un merci spécial à M. Jean-Louis Laforte, professeur émérite, pour son soutien ainsi que pour ses encouragements. Je le remercie de m'avoir permis de travailler à ses côtés, il est passionné par ce qu'il fait et est également une excellente source de motivation.

Finalement, je remercie mes proches, ma mère, mon beau-père ainsi que ma sœur pour m'avoir encouragée et soutenue. Vous m'avez permis de poursuivre jusqu'au bout. Je remercie mon copain Louis pour sa motivation ainsi que son amour et son support. Je te remercie de m'avoir accompagnée tout au long de mes études et d'avoir toujours été à mes côtés.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES FIGURES EN ANNEXE.....	x
LISTES DES ABRÉVIATION ET SYMBOLES	xi
1 INTRODUCTION	14
1.1 Mise en situation	14
1.2 Évaluation de l'érosion par la pluie	17
1.3 Problématique	20
1.4 Objectifs	20
1.4.1 Objectif principal	20
1.4.2 Objectifs spécifiques	20
1.5 Méthodologie	21
1.6 Plan de travail	21
2 REVUE LITTÉRAIRE	23
2.1 Phénomène de l'érosion par la pluie	23
2.2 Montages à bras tournant	27
2.2.1 Montage à bras tournant AFRL (<i>Air Force Research Laboratory</i>).....	28
2.2.2 Montage à bras tournant WARER (<i>Warling Arm Rain Erosion Rig</i>).....	30
2.2.3 Montage à bras tournant développé par SAAB Technologie.....	31
2.3 Montages à jet d'eau	31
2.3.1 Montage à jet d'eau PJET (<i>Pulsating Jet Erosion Test</i>)	31
2.3.2 Montage à jet d'eau SIJA (<i>Single Impact Jet Apparatus</i>).....	33
2.3.3 Montage à jet d'eau MIJA (<i>Multiple Impact Jet Apparatus</i>).....	34
2.3.4 Montage AWJM (<i>Abrasive Water Jet Milling</i>)	35
2.4 Récapitulatif des montages étudiés dans la littérature	36
2.5 Tribologie.....	40
2.5.1 Introduction.....	40

2.5.2	Érosion par particules solides	41
2.5.3	Érosion par particules liquides.....	43
2.5.4	Facteurs influant le taux d'érosion par particules solides et liquides	44
3	APPAREILLAGE ET PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX	48
3.1	Introduction.....	48
3.2	Composantes du montage	48
3.3	Construction du montage	51
3.4	Validation du montage.....	58
3.4.1	Protocole d'essai	58
3.4.2	Calibration.....	59
3.4.3	Essai d'érosion avec une peinture d'avion répondant aux critères aéronautiques	61
3.4.4	Détermination du critère d'échec.....	61
3.4.5	Identification des revêtements évalués	62
3.4.6	Sensibilité du montage.....	63
4	RÉSULTATS	66
4.1	Introduction.....	66
4.2	Fiche d'essai.....	66
4.3	Présentation des résultats	71
5	DISCUSSION	75
5.1	Introduction.....	75
5.2	Nombre d'impacts avant l'apparition de dommages visibles	75
5.3	Comparaison avec les résultats disponibles.....	78
5.4	Profilométrie	80
5.5	Stabilité de la pression et température de l'eau	83
5.6	Épaisseur du revêtement	84
6	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	93
6.1	Conclusions.....	93
6.2	Recommandations.....	94
	BIBLIOGRAPHIE.....	95
	ANNEXES.....	97

Annexe 1 : Protocole de l'érosion par la pluie.....	98
Annexe 2 : Fiches d'essais.....	109
A.2.1 Peinture de fuselage pour les avions.....	109
A.2.2 Revêtement destiné au rotor d'hélices d'avions	121
A.2.3 Époxy à base d'eau	128
A.2.4 Lotus Dry 123	161
A.2.5 Hydrophobic 1.....	176
A.2.6 Hydrophobic 2.....	200
A.2.7 Anti-Erosion 1	218

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composantes du montage AFRL [17]	29
Tableau 2: Tableau comparatif des montages déjà existant.....	38
Tableau 3: Composantes utilisées pour le montage d'érosion par la pluie (Figure 22)	53
Tableau 4: Composantes utilisées pour le montage d'érosion par la pluie (emplacement de la lame d'essai) (Figure 23)	54
Tableau 5: Composantes montrées à la Figure 30	54
Tableau 6: Composantes montées à la Figure 31.....	55
Tableau 7: Composantes montrées à la Figure 32	56
Tableau 8: Composantes utilisées pour le chariot de transport (figure 33)	57
Tableau 9: Identification et épaisseur des quatre revêtements de résistance à l'érosion connue	63
Tableau 10: Identification et épaisseur des trois revêtements industriels.....	63
Tableau 11: Résultats obtenue pour les 4 revêtements de résistance à l'érosion satisfaisant la norme aéronautique.....	71
Tableau 12 : Résultats obtenus avec les 3 revêtements industriels.....	73
Tableau 13 : Valeur critique pour un seuil de risque α de 0,01 et 0,05.....	76

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Érosion par la pluie des lumières de navigation [2]	15
Figure 2: Érosion par la pluie d'un radôme à l'avant d'un avion [2]	15
Figure 3: Érosion par la pluie d'une hélice d'avion [4]	16
Figure 4: Sites d'impacts les plus souvent endommagé sur les avions [5]	16
Figure 5: Spectre typique de pluie à différents taux de précipitation [5]	17
Figure 6: Montage à bras tournant (WARER) avec un échantillons non érodé et érodé [11]	18
Figure 7: Appareil à jet d'eau (PJET) avec un échantillon érodé [3]	19
Figure 8: Mécanismes des bris causés par l'érosion par la pluie	24
Figure 9: Mécanisme d'érosion d'un revêtement	25
Figure 10: Goutte qui entre en collision avec la surface	26
Figure 11: Compression de la goutte d'eau en raison du manque de surface libre (la zone ombragée correspond à la compression du liquide)	26
Figure 12: Jet latéral provoqué par la goutte d'eau en collision sur la cible	27
Figure 13: Érosion et propagation des fissures causées par la projection latérale de la goutte	27
Figure 14: Montage AFRL à bras tournant [17]	29
Figure 15: Montage WARER à bras tournant [19]	30
Figure 16: Montage à bras tournant de SAAB Technologie [19]	31
Figure 17: Schéma du montage PJET [3]	32
Figure 18: Canevas d'évaluation d'échantillon avec le PJET [21]	33
Figure 19: Schéma du montage SIJA	34
Figure 20: Photo du montage MIJA [26]	35
Figure 21: Schéma du montage AWJM [28]	36
Figure 22: Taux d'érosion en fonction de l'angle d'attaque pour des particules de 9 et 21 μm [30]	43
Figure 23: Réflexion et transmission de l'onde de pression [7]	44
Figure 24: Taux d'érosion en fonction de la vitesse d'impact pour un matériau ductile et un fragile [1]	46
Figure 25: Lames d'essais pour l'adhérence de glace et l'érosion par la pluie	48
Figure 26: Schéma du montage à jet d'eau développé au LIMA	49
Figure 27: Partie de la lame exposée aux sites d'impacts des gouttes	50
Figure 28: Présentation du montage d'érosion par la pluie	52
Figure 29: Présentation du montage d'érosion par la pluie (emplacement de la lame échantillon)	53
Figure 30: Filtreur (21) et régulateur de pression (22)	54
Figure 31: Disque rotatif (17) et tube de sortie d'air (23)	55
Figure 32: Variateur de fréquence (24) et sectionneur d'alimentation (25)	56

Figure 33: Chariot de transport	56
Figure 34: Distance entre deux orifices dont dépendent les temps ON et OFF.....	57
Figure 35: Histogramme des pressions moyennes de l'eau des 36 essais	59
Figure 36: Histogramme des températures moyennes de l'eau des 36 essais.....	60
Figure 37: Application du critère d'échec aux 6 échantillons du même revêtement glaciophobe	62
Figure 38: Histogramme du nombre moyen d'impacts avec écart-type produisant l'érosion des 7 revêtements différents	77
Figure 39: Profilométrie de la peinture pour le fuselage des avions.....	80
Figure 40: Érosion progressive d'un revêtement jusqu'au substrat métallique pour 2125 à 106 250 impacts [35]	81
Figure 41: Érosion jusqu'à l'aluminium du revêtement destiné au rotor d'avion	82
Figure 42 : Histogramme de la température de l'eau relatif au les 37 essais	83
Figure 43 : Histogramme de l'épaisseur moyenne pour le revêtement déposé sur un rotor d'hélice avant l'apparition de dommage pour les 2 essais.....	85
Figure 44: Histogramme du nombre d'impacts et de l'épaisseur du revêtement d'époxyde avant l'apparition de dommage pour les 6 essais.....	86
Figure 45: Histogramme de l'épaisseur moyenne pour le revêtement Lotus Dry avant l'apparition de dommage pour les 2 essais	87
Figure 46: Histogramme de l'épaisseur moyenne pour le revêtement Hydrophobic 1 avant l'apparition de dommage pour les 6 essais	88
Figure 47: Histogramme de l'épaisseur moyenne pour le revêtement Hydrophobic 2 avant l'apparition de dommage pour les 6 essais	89
Figure 48: Histogramme de l'épaisseur moyenne pour le revêtement Anti-Erosion 1 avant l'apparition de dommage pour les 6 essais	90

LISTE DES FIGURES EN ANNEXE

Figure A 1 : Grillage des sites d'impacts dispersés en dix rangées avec cinq sites par rangée.....	98
Figure A 2: lame d'aluminium	99
Figure A 3: Abrasif de finition lignée de type BLENDEX	99
Figure A 4: Modèle d'application du revêtement sur la lame d'aluminium.....	100
Figure A 5: lame d'essai sans le revêtement sur les côtés.....	101
Figure A 6: Configuration du panneau de contrôle	101
Figure A 7: Emplacement de la lame d'essai.....	102
Figure A 8: lame d'essai.....	102
Figure A 9: Positionnement de la lame d'essai sous la buse	103
Figure A 10: Montage prêt à être utilisé	104
Figure A 11: Poignée de sortie d'eau en position ouverte.....	104
Figure A 12: Sectionneur d'alimentation électrique en position ouvert.....	105
Figure A 13: Commutateur électrique	105
Figure A 14: Écran d'accueil de l'ordinateur de contrôle.....	106
Figure A 15: Évaluation du taux d'érosion à l'aide du pochoir.....	107
Figure A 16: Prise de photos des sites d'impacts à l'aide du microscope	107
Figure A 17: Montage pour la caméra	108
Figure A 18: Réglage des paramètres de la caméra Canon EOS 70D	108

LISTES DES ABRÉVIATION ET SYMBOLES

TiN : Nitrure de titane

Cr : Chrome

V : Vitesse de déplacement de la goutte (vitesse d'impact)

C : Vitesse d'onde de choc

P_c : Pression exercée sur la surface

ρ : Densité de l'eau (1000 Kg/m³)

V_j : Jet de fluide latéral à grande vitesse

LIMA : Laboratoire International des Matériaux Antigivre

AFRL: Air Force Research Laboratory

WARER: Warling Arm Rain Erosion Rig

SIJA: Single Impact Jet Apparatus

MIJA: Multiple Impact Jet Apparatus

AWJM: Abrasive Water Jet Milling

PJET: Pulsating Jet Erosion Test

Nbr. : Nombre

Capil. : Capillaire

Éch. : Échantillon

Circ. : Circulaire

Dia. : Diamètre

Épai. : Épaisseur

Fréquen. : Fréquence

Rota. : Rotation

Dist. : Distance

Alu. : Aluminium

W_E : Usure par érosion

k : Coefficient d'usure

n : Exposant de la vitesse des gouttes

U : Vitesse des gouttes

v : Vitesse de sortie d'eau

q : Débit d'eau

d : Diamètre de la buse

Q : Test Q de Dixon

x_n : Donnée supposée aberrante

x_1 : Donnée la plus petite de la série

$Q_{0,90}$: Valeur critique selon la table du Q de Dixon (0.468)

R_a : Rugosité moyenne

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en situation

L'érosion est l'un des multiples phénomènes de l'usure des matériaux. Selon le *Petit Larousse 2015*, l'usure est la détérioration par un usage prolongé par le frottement, l'érosion et l'utilisation. Les principaux paramètres influençant le taux d'érosion sont : la force appliquée au contact, la température, l'aire de contact, l'état physico-chimique des surfaces de frottement, la rugosité, la structure cristallographique, les propriétés mécaniques des matériaux et la présence d'agents anti-frottement, comme des additifs anti-usure [1]. Dans tous les domaines d'activités, l'usure des matériaux est un problème incontournable qui est très important et souvent difficile à résoudre et susceptible de causer des bris inattendus.

Il existe différents types d'érosion comme celle induit par particules solides, par circulation d'un fluide, par gouttes d'eau, par abrasion, par frottement et par cavitation [1]. Ce mémoire traitera plus précisément de l'usure due à l'érosion causée par l'impact d'une goutte de pluie sur la surface d'un matériau. De façon générale, l'érosion par gouttes de pluie se produit lorsque celles-ci frappent un objet à grande vitesse. À haute vitesse, les gouttes se comportent comme des petits missiles et leur énergie d'impact est en mesure de briser les composantes d'un revêtement, ce qui peut créer progressivement un effet d'éclaboussure et de bris total. L'effet érosif causé par la pluie dépend de différents facteurs : les facteurs intrinsèques à la goutte sont le diamètre, la vitesse et la température et les facteurs intrinsèques aux propriétés mécaniques des revêtements sont la rugosité et la rigidité [2].

Dans le domaine aérospatial, l'érosion par la pluie des peintures protectrices appliquées sur les avions représente un sujet d'étude important. Les **Figure 1**, **Figure 2** et **Figure 3** montrent trois cas où il y a endommagement de l'équipement d'un avion causée par l'érosion par la pluie [3].

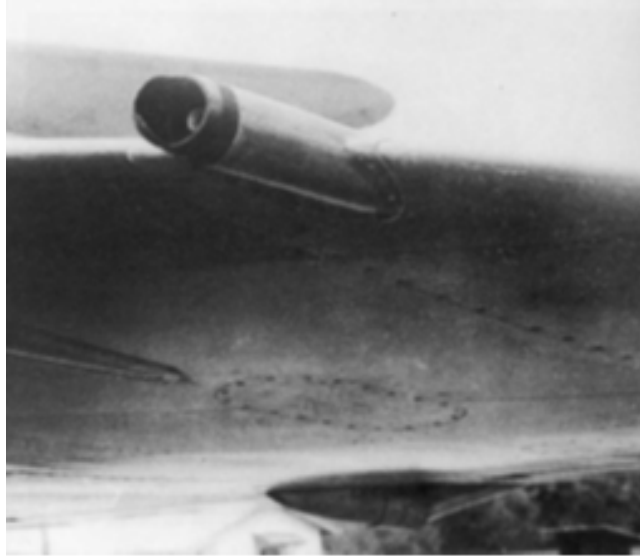


Figure 1: Érosion par la pluie des lumières de navigation [2]

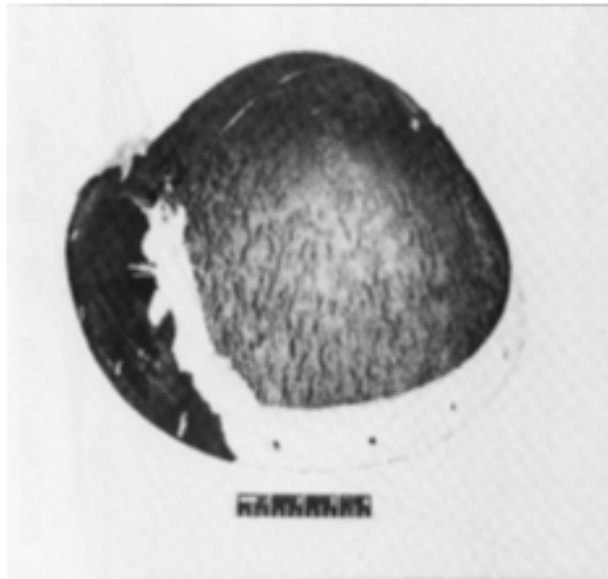


Figure 2: Érosion par la pluie d'un radôme à l'avant d'un avion [2]



Figure 3: Érosion par la pluie d'une hélice d'avion [4]

Habituellement, les avions les plus touchés par l'érosion sont ceux qui volent à très grande vitesse tels les avions militaires. Les dommages causés par l'impact répété de gouttes d'eau sont observés principalement sur les structures de bord des aéronefs à voilure fixe comme les ailes, le moteur, la nacelle, etc., ainsi que sur les bords d'attaque des hélices et sur les pales des hélicoptères. La **Figure 4** est un exemple d'un avion de type commercial où les zones pointillées identifient les sites d'impacts les plus souvent endommagés [3, 5].

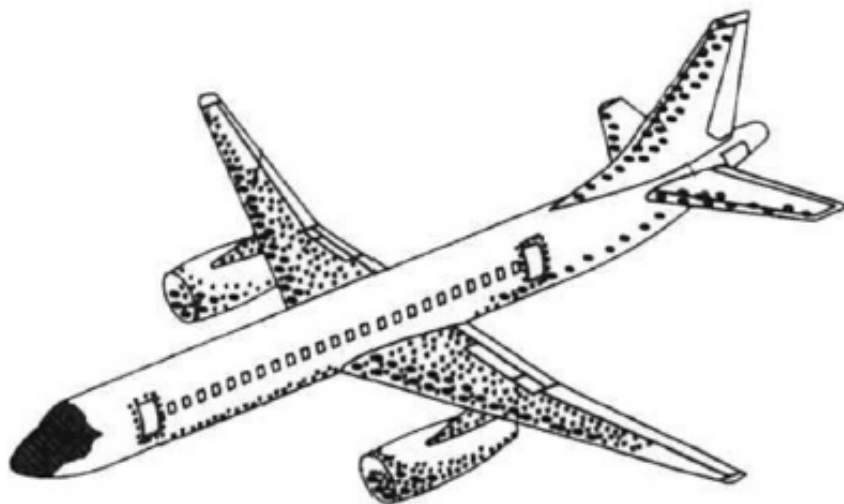


Figure 4: Sites d'impacts les plus souvent endommagé sur les avions [5]

1.2 Évaluation de l'érosion par la pluie

Selon les données recueillies par les chercheurs, le diamètre le plus probable des gouttes observées à un taux de précipitation de 24,5 mm/h est de 2 mm [5]. Ce taux correspond à celui des pluies abondantes le plus souvent rencontrées par les avions. Le fait d'avoir un diamètre de goutte fixe permet d'avoir des résultats comparatifs entre les différents laboratoires qui font l'évaluation du taux d'érosion par la pluie. Ces deux conditions, 2 mm de diamètre et taux de précipitation de 24,5 mm/h, sont les valeurs normalisées de l'essai de certification répondant à la norme *AMS-C-83231A Coatings, Polyurethane, Rain Erosion Resistant for Exterior Aircraft and Missile Plastic Parts* [16]. En utilisant ce diamètre standardisé, une corrélation entre les résultats de différents laboratoires peut être effectuée. Le graphique de la **Figure 5** montre les spectres typiques de pluie à différents taux de précipitation. [5]

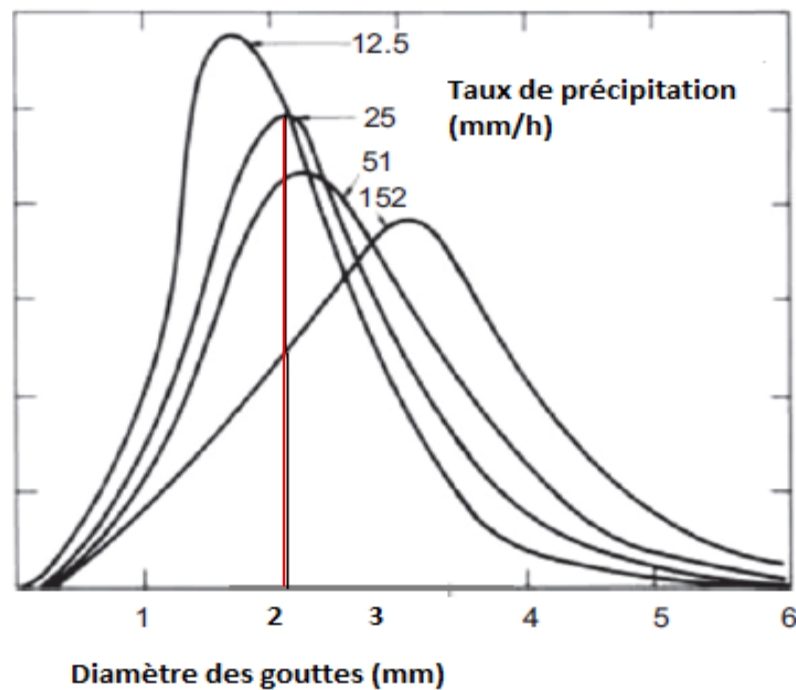


Figure 5: Spectre typique de pluie à différents taux de précipitation [5]

La résistance à l'érosion par la pluie est évaluée avec différentes méthodes qui sont encadrées par la norme *ASTM Standard Test Methode For Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus* [10]. Il existe deux types de montages pour la mesurer : à bras

tournant et à jet d'eau. Par exemple, l'Université de Limerick a développé le WARER (*Warling Arm Rain Erosion Rig*) à bras tournant illustré à la **Figure 6** tandis que celle de Munich, le PJET (*Pulsating Jet Erosion Test*) à pulsation d'un jet d'eau est présentée à la **Figure 7** [3].

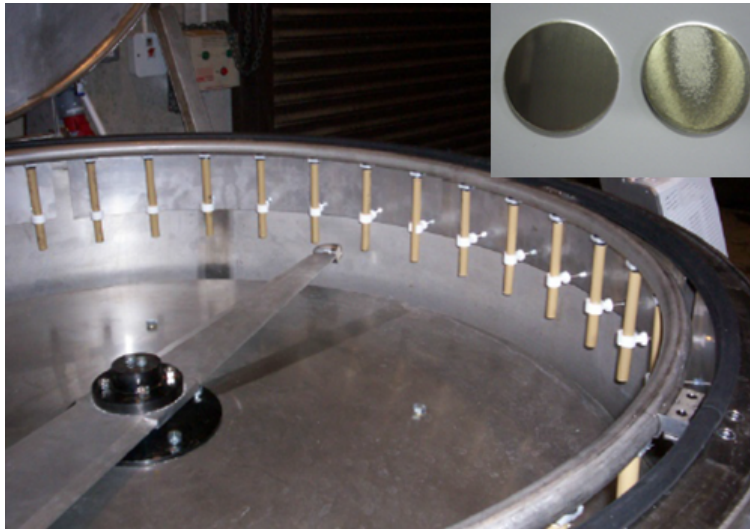


Figure 6: Montage à bras tournant (WARER) avec un échantillons non érodé et érodé
[11]



Figure 7: Appareil à jet d'eau (PJET) avec un échantillon érodé [3]

Le laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA) est un laboratoire de recherche sur le dégivrage dans le domaine des transports, rattaché au Département des sciences appliquées de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Le LIMA effectue des travaux de pointe en vue de résoudre les problèmes de givrage dans le domaine des transports et d'en minimiser les inconvénients. Ces activités de recherche contribuent entre autres, à l'homologation des produits dégivrants et antigivre utilisés pour les avions et les pistes d'aéroports, qui doivent être à la fois efficaces et sécuritaires dans les conditions de glace les plus sévères.

L'une des expertises développées au laboratoire LIMA est l'évaluation de l'adhérence de la glace à des revêtements glaciophobes, c'est-à-dire des revêtements protecteurs contre le glaçage atmosphérique. Entre autres, deux méthodes comparatives ont été développées afin d'évaluer leur efficacité à réduire l'adhérence de la glace pour la première, et l'accumulation de glace pour la seconde. Quant à la possibilité d'utiliser des revêtements glaciophobes sur les avions et les hélicoptères, il a été démontré que, malgré leur bonne efficacité à réduire l'adhérence à la glace [12, 13], ils s'érodent par la pluie de

façon très importante [14, 15]. Dans ces études, les revêtements glaciophobes étudiés ne répondaient pas à la norme AMS-C-83231A [16]. Dans le but d'aider les manufacturiers à développer des revêtements plus résistants tout en conservant leurs propriétés glaciophobes, le laboratoire souhaite développer un essai pouvant évaluer la résistance à l'érosion par la pluie, accessible et parfaitement adapté aux échantillons présentement utilisés pour mesurer l'adhérence et l'accumulation de la glace.

1.3 Problématique

En Amérique du Nord, il existe une seule installation offrant aux compagnies extérieures un service d'essais qui évalue la résistance à l'érosion par la pluie. Ce laboratoire situé à l'université de Dayton utilise un montage à bras tournant avec lequel ils sont en mesure de faire la certification complète des revêtements utilisés en aérospatiale, selon la norme AMS-C-83231A [16]. Toutefois, ce service est long et coûteux, ce qui le rend difficilement utilisable à l'étape du développement des revêtements glaciophobes. Donc un essai plus simple et plus accessible aiderait les manufacturiers à développer et à améliorer la résistance à l'érosion de leurs produits et leurs permettraient ainsi d'identifier les revêtements les plus prometteurs.

1.4 Objectifs

1.4.1 Objectif principal

L'objectif principal de cette maîtrise est de développer un montage simulant l'érosion par la pluie de type jet d'eau capable d'évaluer le niveau de résistance à l'érosion de différents revêtements glaciophobes.

1.4.2 Objectifs spécifiques

- Déterminer le type de montage répondant aux besoins et aux limites du laboratoire;
- Développer le montage de façon à utiliser les mêmes lames échantillons que celles utilisées pour l'essai d'adhérence de la glace;
- Valider l'appareil en quatre étapes :

1. Caractérisation des différents paramètres de l'appareil dont la pression et la température de l'eau, la robustesse du logiciel de contrôle;
2. Établissement du protocole d'essai;
3. Détermination du critère d'échec;
4. Validation du montage quant à la sensibilité et la répétabilité des résultats avec quelques revêtements présentant différentes résistances à l'érosion.

1.5 Méthodologie

Afin de répondre aux objectifs de ce projet, une étude littéraire approfondie des montages déjà existant a été effectuée. Cette revue littéraire a permis d'identifier, le montage de type jet d'eau. Ce dernier est celui le mieux documenté permettant le plus facilement d'adapté le montage qui sera développé au laboratoire en fonction de ses besoins et ses limites physique et de sécurité. De plus, il sera possible d'utiliser les même lames échantillons qu'un essai déjà existant au laboratoire. Enfin, des essais de validation effectués sur sept revêtements différents dont des peintures répondant à la norme AMS-C-83231A [16] ainsi que quelques peintures obtenues de l'industrie a été effectués.

1.6 Plan de travail

Ce mémoire est divisé en sept chapitres. Le chapitre 1 introduit le sujet de recherche incluant la problématique, les objectifs ainsi que la méthodologie utilisée. Le chapitre 2 est consacré à une revue littéraire rattachée aux phénomènes d'érosion par la pluie et aux montages connus pour l'évaluation de l'érosion par la pluie. Après analyse on y définit chaque type de montage en y spécifiant leurs particularités. Ce chapitre introduit également les théories tribologiques de base sur l'érosion des revêtements. Le chapitre 3 décrit le montage à jet d'eau qui a été retenu. Le chapitre 4 est consacré à la présentation des résultats. Après discussion des résultats au chapitre 5, le chapitre 6 présente la conclusion ainsi que les recommandations. Finalement, après la bibliographie du mémoire, on présente la section des annexes. Cette section présente le protocole expérimental ainsi que les fiches d'essais complétées.

CHAPITRE 2

REVUE LITTÉRAIRE

2 REVUE LITTÉRAIRE

La revue littéraire comporte cinq sections. La première section explique le phénomène de l'érosion par la pluie. Les sections deux et trois expliquent les grands principes des deux types de montages déjà existants, ceux à bras tournant et à jet d'eau. La quatrième section présente un tableau récapitulatif montrant les différences qui distinguent chaque montage. Finalement, la dernière section introduit les théories tribologiques de base expliquant l'érosion des revêtements.

2.1 Phénomène de l'érosion par la pluie

Le mécanisme de dommage causé par les gouttes d'eau fait qu'elles forment des fissures sur le revêtement lorsqu'elles y impactent. Les dommages superficiels sont induits par les hautes pressions occasionnées par l'impact créant un jet latéral lorsque la goutte éclate sur la surface. La durée du cisaillement pour un seul impact est de l'ordre de quelques millisecondes. L'érosion causée par les gouttes dépend du processus de rupture en jeu [6]. Les processus de base sont (**Figure 8**) :

1. L'abrasion, qui est une forme de dommage qui se produit lorsqu'un matériau glisse sur un autre;
2. La fatigue de surface, créant une fissure soumise à un cycle répété de contraintes;
3. La déformation plastique;
4. L'usure par cavitation;
5. La fragilité du revêtement, favorisant la propagation de la fissure.

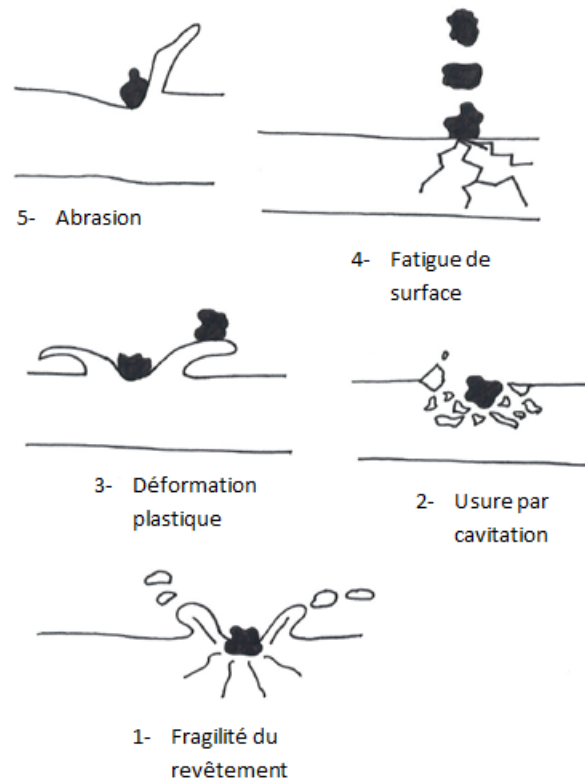


Figure 8: Mécanismes des bris causés par l'érosion par la pluie

Une étude effectuée par Lee, Kim et al., [7] illustre le mécanisme général d'érosion par goutte d'eau (**Figure 9**) avec, comme exemple, une couche de TiN déposée sur un alliage d'acier contenant 12% de chrome. Premièrement, le revêtement est affaibli par la déformation plastique du substrat ductile, causant localement une dépression. Plus le nombre d'impacts est grand, plus la dépression se creuse, endommageant davantage le revêtement. Par la suite, des fissures se forment autour de la dépression, causant progressivement la disparition du revêtement. [7]

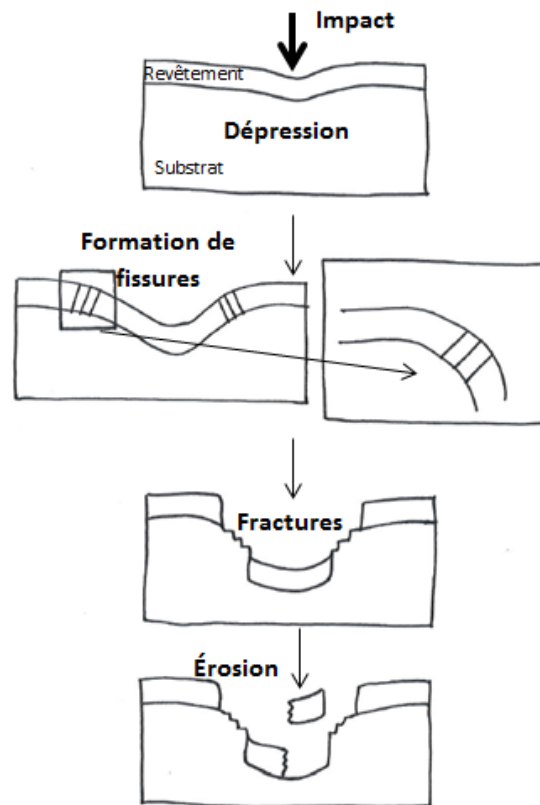


Figure 9: Mécanisme d'érosion d'un revêtement

Les matériaux fragiles sont particulièrement vulnérables à l'érosion en raison de la facilité des fissures déjà existantes à se propager lorsque les gouttes frappent la surface. L'impact de la goutte sur la surface produit une contrainte de cisaillement sur le revêtement. Les contraintes sont le plus couramment concentrées dans les fissures et les rainures mineures déjà existantes.[4] L'étendue des dégâts causés par l'érosion dépend de l'angle d'incidence, de la vitesse, ainsi que de la grosseur de la goutte, du taux de précipitation et, évidemment, du type de revêtement [8].

L'impact d'une goutte d'eau se fait en deux étapes à une vitesse (V). La première se produit lorsque le bord de contact entre la surface du revêtement et la goutte se déplace plus rapidement (V) que la vitesse d'onde de choc (C) dans la goutte (**Figure 10**). L'onde de choc illustrée à la **Figure 11** est créée lorsque la goutte va se comprimer à très grande vitesse, car il n'y a pas de surface libre dans laquelle la pression peut être libérée.[9]

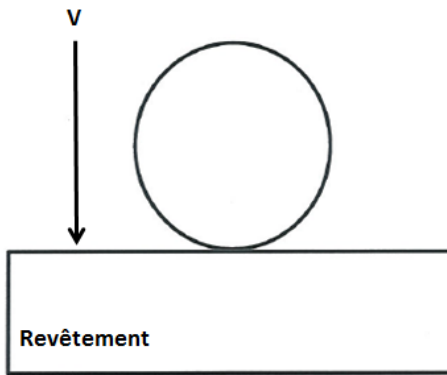


Figure 10: Goutte qui entre en collision avec la surface

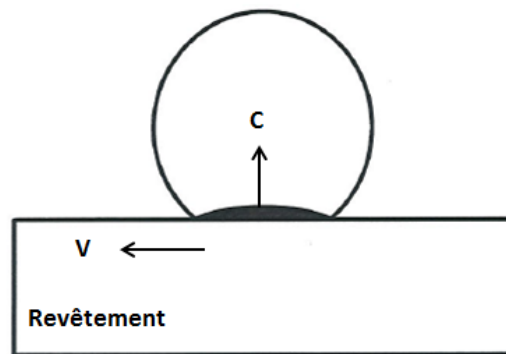


Figure 11: Compression de la goutte d'eau en raison du manque de surface libre (la zone ombragée correspond à la compression du liquide)

Lors d'un impact, la pression (P_c) exercée sur la surface est connue sous le nom de «*Water Hammer Pressure*» communément appelé coup de bélier, qui fait référence au phénomène de surpression qui apparaît au moment de la variation brusque de la vitesse d'un liquide [9]. Ce phénomène est traduit par l'équation suivante :

$$P_c = \rho CV \quad (1)$$

Où ρ correspond à la densité de l'eau qui est de 1000 kg/m^3 , C à la vitesse de l'onde de choc et V à la vitesse d'impact de la goutte. Cette onde de pression peut causer des fissures jusqu'à une délamination du revêtement. [9]

Ensuite, lorsque l'onde de choc se déplace vers la surface libre de la goutte d'eau, il y a libération de la pression et la goutte d'eau s'étend sur la surface du revêtement. L'interaction entre la goutte et la cible provoque un jet de fluide latéral à grande vitesse (V_j) qui est plus rapide que la vitesse d'impact (V), comme illustrée à la **Figure 12** [9].

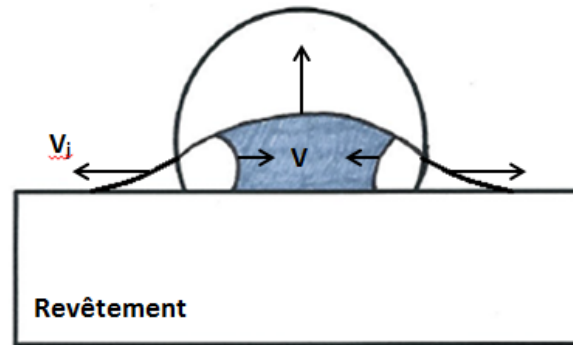


Figure 12: Jet latéral provoqué par la goutte d'eau en collision sur la cible

C'est la projection latérale de la goutte qui, au contact avec les aspérités superficielles du revêtement, va causer l'érosion du matériau par initiation et propagation des fissures, comme illustré à la **Figure 13** [9].

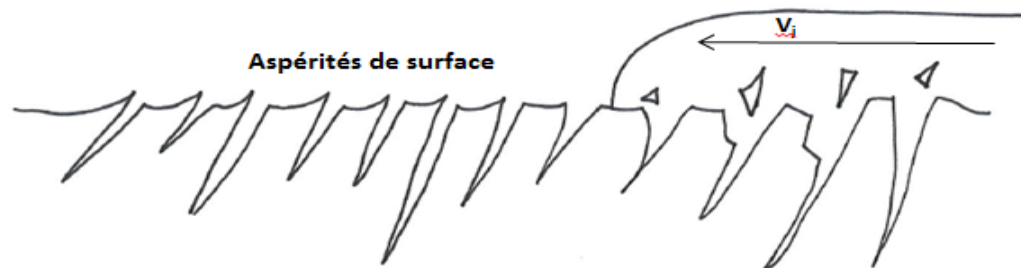


Figure 13: Érosion et propagation des fissures causées par la projection latérale de la goutte

2.2 Montages à bras tournant

Trois montages à bras tournant ont été développés. Leur principe de base est similaire, même s'il présente quelques petites différences dans la fabrication et les paramètres d'évaluation. Grossièrement, l'échantillon de revêtement à évaluer est fixé à

l'extrémité d'un bras tournant à grande vitesse qui vient frapper les gouttes de pluie générées par un ensemble de capillaire. Les résultats obtenus sont exprimés en termes de temps de tenue à l'érosion.

2.2.1 Montage à bras tournant AFRL (*Air Force Research Laboratory*)

Le montage à bras tournant AFRL compte environ 30 ans d'histoire. En 1994, il a à son actif plus de 45 000 évaluations qui ont permis d'étudier la résistance à l'érosion des matériaux. L'AFRL a été mis au point à l'Institut de recherche de l'université de Dayton dans l'Ohio pour simuler les conditions les plus représentatives de l'érosion par la pluie. Les résultats obtenus jusqu'à maintenant avec cet appareil corrént avec ceux observés sur les avions en vol. En effet, l'AFRL est capable de simuler des vitesses variant entre 44,7 et 402 m/s [17, 18] et ainsi de répondre aux conditions de la norme AMS-C-83231A [16] qui correspond à un taux de précipitation de 25.4 mm/h. Les revêtements évalués doivent être appliqués sur des échantillons en forme de profil aérodynamique représentant, par exemple, le bord d'attaque d'une aile d'avion.

Le montage illustré à la **Figure 14** et au **Tableau 1** se compose d'une lame double, comportant deux bras, où l'échantillon de revêtement étudié atteint de grandes vitesses. Les bras tournants sont montés horizontalement dans un puit vertical d'un diamètre de 2,44 m.

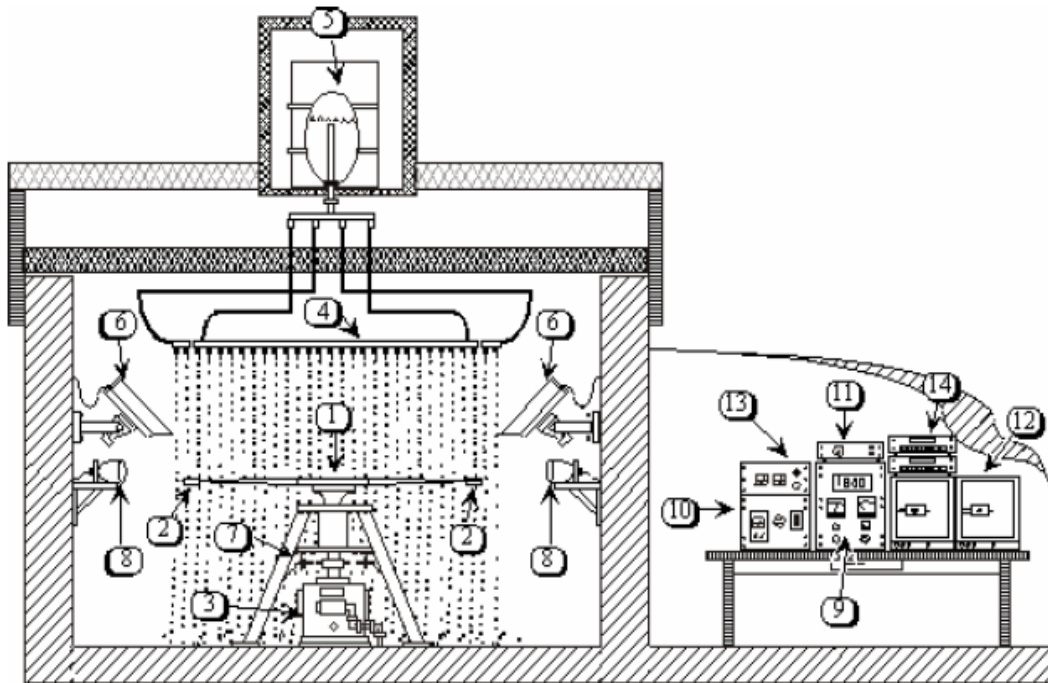


Figure 14: Montage AFRL à bras tournant [17]

Tableau 1: Composantes du montage AFRL [17]

Numéros	Composantes
1	Lame double comportant deux bras
2	Échantillons de revêtement
3	Boîte de vitesses d'entraînement vertical
4	24 capillaires générant les gouttes de pluie
5	Réservoir d'eau pour la simulation de pluie
6	Caméra de contrôle
7	Éclairage
8	Lumière à haute intensité
9	Contrôle et lecteur de vitesse
10	Contrôle stroboscopique
11 à 14	Instruments de contrôle du montage

La simulation de la pluie est effectuée par 4 compartiments contenant 24 capillaires, chacun projetant de 6 à 7 gouttes de 1,8 à 2 mm. Tous les paramètres de l'appareil et de

l'essai sont mesurés en temps réel dans une chambre de contrôle. L'essai est filmé durant toute l'expérience, jusqu'à l'érosion complète des revêtements étudiés.

2.2.2 Montage à bras tournant WARER (*Warling Arm Rain Erosion Rig*)

L'appareil à bras tournant WARER, dont le montage et les composantes sont illustrés à la **Figure 15**, a été conçu et construit à l'Université de Limerick, en Irlande. Son principe est le même que celui du montage AFRL, mais appliqué à plus petite échelle. L'échantillon est placé à l'extrémité d'un bras tournant, qui est par la suite accéléré à haute vitesse. Les gouttes d'eau sont produites par 36 capillaires de 0,15 mm de diamètre [19], où elles atteignent dans l'appareil le diamètre de 2 mm et le taux de précipitation de 25,4 mm/h requis par la norme. En raison de sa petite taille, l'appareil est doté d'une unité de refroidissement afin de compenser pour le gain de chaleur créé lors de l'essai. En effet, un circuit d'eau à 0 °C permet de maintenir l'air dans la chambre à une température de 18 °C. [3]

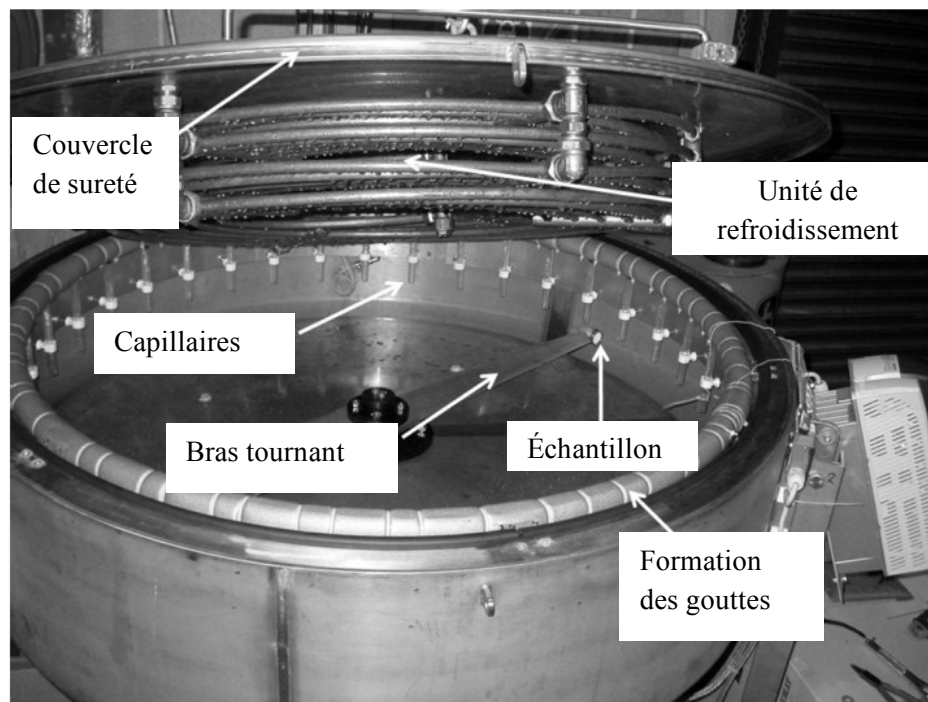


Figure 15: Montage WARER à bras tournant [19]

2.2.3 Montage à bras tournant développé par SAAB Technologie

Ce montage à bras tournant illustré à la **Figure 16** a été conçu dans les années 1960 en Suède et est l'un des premiers construits [19]. Les vitesses d'impacts peuvent atteindre jusqu'à 300 m/s. Les diamètres des gouttes générées sont de 1,2, 1,6 et 2,0 mm et les taux de précipitation varient entre 1,4 mm/h et 25,0 mm/h, simulant 16 étapes de précipitations allant d'une faible pluie à une pluie intense [19].

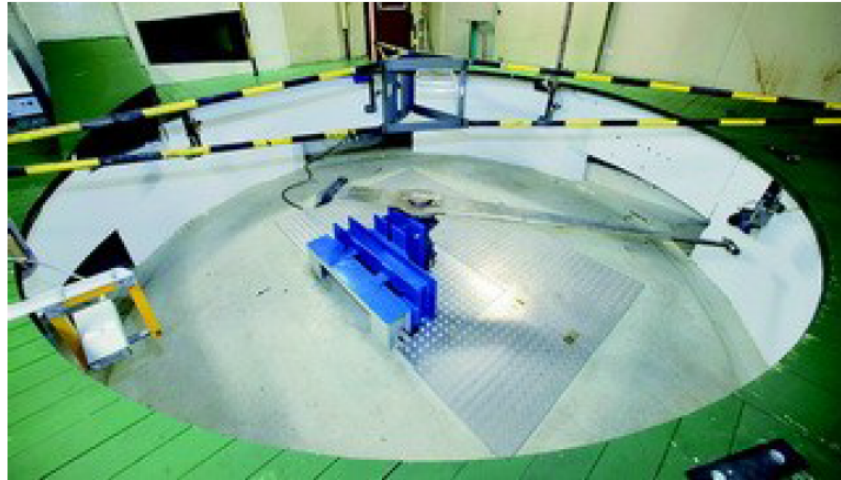


Figure 16: Montage à bras tournant de SAAB Technologie [19]

2.3 Montages à jet d'eau

Les montages à jet d'eau sont une seconde façon d'évaluer l'érosion par la pluie. Pour ces montages, à la différence de ceux à bras tournant où l'échec est évalué par le temps requis pour obtenir l'érosion complète du revêtement, l'échec est évalué par le nombre d'impacts avant que le revêtement se retrouve avec des dommages visibles. Le principe de cet appareil est de simuler une goutte de pluie qui frappe, à grande vitesse, un objet qui est statique. La revue littéraire a permis d'identifier quatre différents montages de ce type : le PJET (*Pulsating Jet Erosion Test*), le SIJA (*Single Impact Jet Apparatus*), le MIJA (*Multiple Impact Jet Apparatus*) ainsi que le AWJM (*Abrasive Water Jet Milling*).

2.3.1 Montage à jet d'eau PJET (*Pulsating Jet Erosion Test*)

Le montage à jet d'eau PJET, illustré à la **Figure 17**, a été développé à l'EADS *Innovation Works* à Ottobrunn, en Angleterre [19]. Le principe de cet appareil est basé

sur une méthode développée au laboratoire Cavendish à l'Université de Cambridge. Le concept de base est qu'un jet d'eau projeté sur un échantillon peut causer des dommages similaires à ceux produits par une goutte de pluie [3].

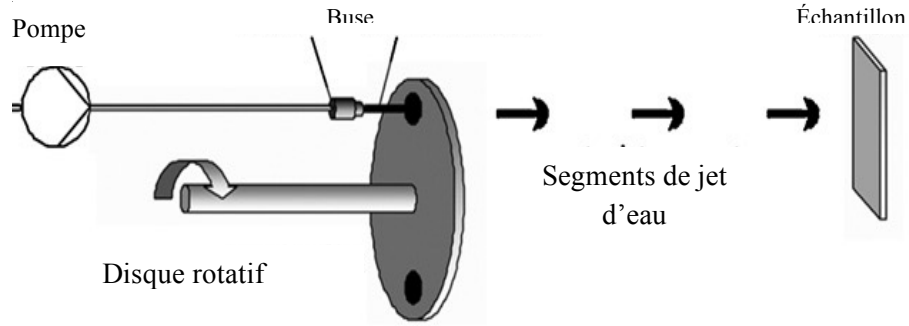


Figure 17: Schéma du montage PJET [3]

Les gouttes de 2 mm de diamètre sont simulées par un jet d'eau projeté à haute vitesse, entrecoupé par un disque tournant contenant deux orifices de 10 mm de diamètre placés de façon opposée. Ce disque tourne à une fréquence de 20 Hz correspondant à une fréquence d'impact de 40 Hz [20-22]. Cette fréquence d'impact reproduit celle d'un avion volant à une vitesse de 225 m/s à travers une pluie de 25,4 mm/h. Dans ce montage, la vitesse du jet d'eau est de 180 m/s [3]. Pour ce faire, le diamètre de la buse à la sortie du jet d'eau doit être de 0,8 mm et la pression d'eau de 32,5 MPa. La vitesse d'impact du jet est contrôlée par l'ajustement de la pression d'eau. L'échantillon fixé à un support motorisé doit être placé à 60 mm de la buse pour obtenir une goutte de 2 mm de diamètre [20-22]. Un courant d'air sec est maintenu pour éliminer de la surface le surplus d'eau [20]. L'évaluation des échantillons est faite selon un canevas de points illustré à la **Figure 18**. Les sites d'impact sont espacés de 5 mm et cinq répétitions pour chaque nombre d'impacts sont effectuées. Chaque rangée correspond à un nombre d'impacts croissant, compris entre 20 et 10 000 impacts.

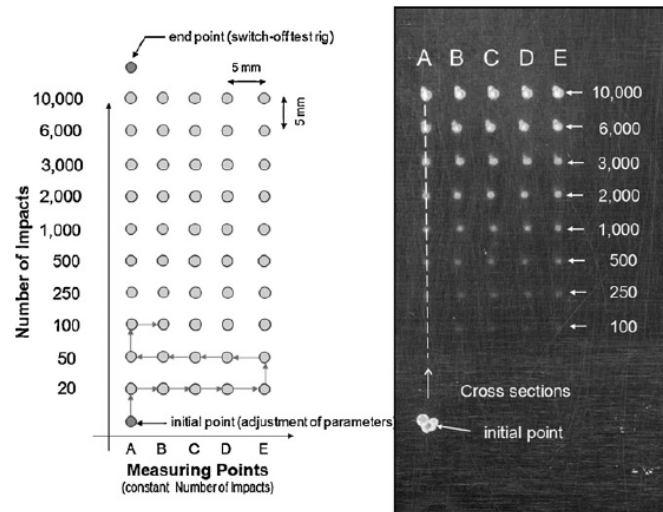


Figure 18: Canevas d'évaluation d'échantillon avec le PJET [21]

Le PJET est une méthode plus rapide pour estimer la résistance à l'érosion par la pluie et moins coûteuse qu'un montage à bras tournant. La zone d'essai est, toutefois, petite et par conséquent, ne permet pas l'évaluation des effets sur de grandes surfaces [21].

2.3.2 Montage à jet d'eau SIJA (*Single Impact Jet Apparatus*)

Le SIJA, illustré à la **Figure 19**, est l'un des premiers montages développés dans les années 1920, il consiste à projeter à des vitesses très élevées un unique jet d'eau perpendiculairement à un échantillon. Ce montage permet de faire les essais à partir d'un seul impact. Le principe consiste à remplir la buse d'eau à partir d'un réservoir, en s'assurant qu'il n'y ait pas de bulles d'air dans la buse. Une fois la buse remplie, on déclenche le jet à partir d'une valve à la sortie. La vitesse d'expulsion du jet, variant entre 90 m/s et 1000 m/s, est obtenue en variant la pression du réservoir. [23-25]

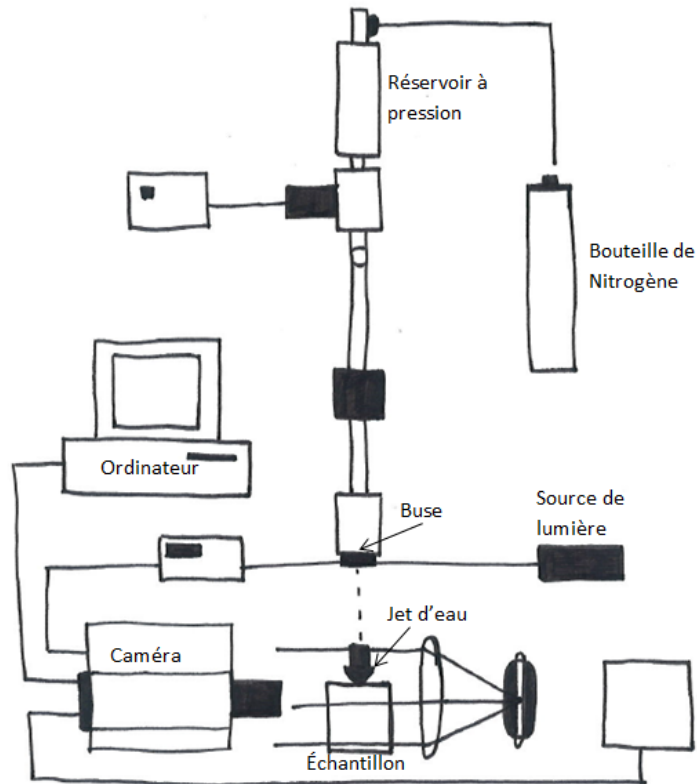


Figure 19: Schéma du montage SIJA

2.3.3 Montage à jet d'eau MIJA (*Multiple Impact Jet Apparatus*)

Le MIJA, développé à l'Université de Cambridge en Angleterre dans les années 1950, a été spécialement conçu pour améliorer le SIJA comportant un unique jet décrit précédemment [26]. L'appareil illustré à la **Figure 20** projette de multiples jets d'eau au hasard sur la surface de l'échantillon. Ces conditions sont comparables à celle d'un avion volant à une vitesse de 225 m/s à travers une pluie de 25 mm/h, ou 820 gouttes viennent frapper une zone de 1,2 mm de diamètre. La durabilité du revêtement peut être obtenue de façon approximative par cette méthode en un temps relativement court, 20 secondes d'essai correspondant à environ 1 heure de vol sous la pluie [22]. Le diamètre de la buse du MIJA peut varier de 0,4 à 1,6 mm, permettant l'obtention de goutte allant de 2 à 10 mm de diamètre à des vitesses variant entre 80 à 250 m/s [26] [27] [25].

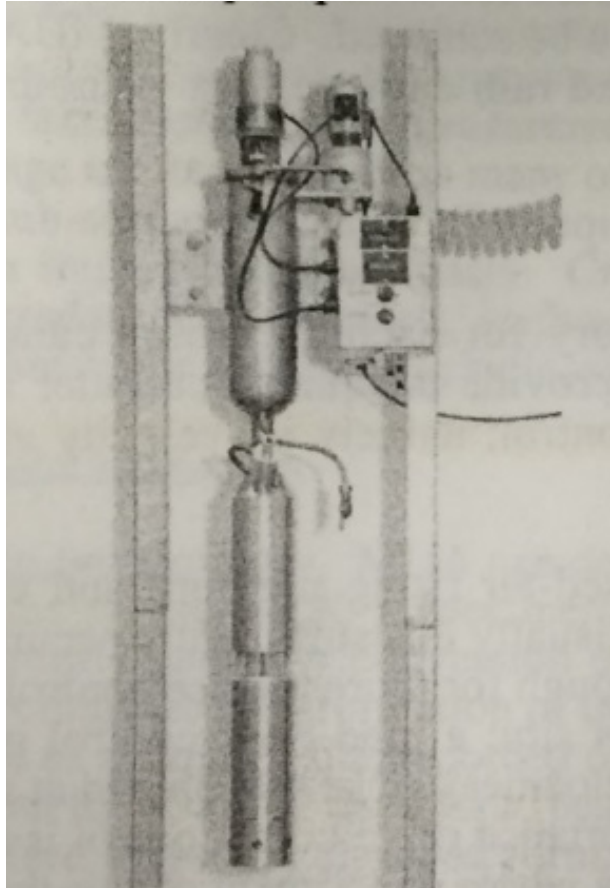


Figure 20: Photo du montage MIJA [26].

2.3.4 Montage AWJM (*Abrasive Water Jet Milling*)

Le montage AWJM, illustré à la **Figure 21**, a pour principe l'érosion rapide des revêtements par un jet d'eau à haute vitesse. La température de l'eau est relativement froide afin d'éviter de faire chauffer le revêtement. Cette technique s'apparente à celle utilisée lors de la découpe de contour des céramiques. L'échantillon est placé à 5 mm d'une buse de 0,5 mm de diamètre, avec un angle qui peut varier entre 10 et 90 °. La pression de 241 MPa projette le jet d'eau à une vitesse de 0,2 m/s [28]. Ce montage simule un jet d'eau continu qui n'est toutefois pas représentatif des gouttes de pluie.

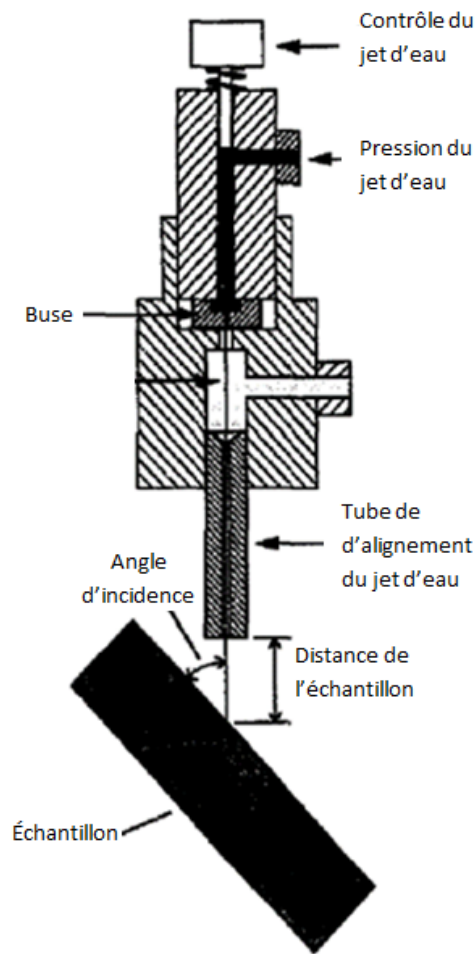


Figure 21: Schéma du montage AWJM [28]

2.4 Récapitulatif des montages étudiés dans la littérature

Le **Tableau 2** résume les principales caractéristiques des sept montages d'évaluation de l'érosion par la pluie, décrites dans les sections 2.2 et 2.3. Les sept montages construits sont conformes à la norme standard ASTM [10] sans toutefois reproduire toutes les conditions d'essais de la norme AMS-C-83231A [16], cette dernière exigeant un diamètre de goutte de 2 mm et un taux de précipitations de 25,4 mm/h. Pour leur part, la taille des gouttes pour les trois (3) montages à bras tournant varie de 1,2 à 2,0 mm et la vitesse des échantillons de 44,7 à 300 m/s, comparativement aux quatre montages à jet d'eau où la taille des gouttes varie de 2 à 10 mm et le taux de précipitation de 1,4 mm/h à 25,4 mm/h. Le **Tableau 2** comprend la désignation des montages suivis de l'année dans lequel ils ont été développés. Dépendamment du type de montage auquel on fait

référence, ses caractéristiques y sont inscrites. Les caractéristiques présentées sont : le type d'érosion, le nombre de capillaires, le nombre de gouttes par capillaire, le diamètre des gouttes simulées, la vitesse de l'échantillon, la vitesse des gouttes, le taux de précipitation produit, la fréquence de rotation du disque, la fréquence d'impact, le diamètre de la buse, la pression d'eau, la distance entre la buse et l'échantillon ainsi que profil de l'échantillon.

Tableau 2: Tableau comparatif des montages déjà existant

Désignations (Ref. Section)	AFRL (2.1.1)	WARER (2.1.2)	SAAB (2.1.3)	PJET (2.2.1)	SIJA (2.2.2)	MIJA (2.2.3)	AWJM (2.2.4)
Années	1970		1960		1920	1950	
Montage	Bras tournant	Bras tournant	Bras tournant	Jet d'eau	Jet d'eau	Jet d'eau	Jet d'eau
Type d'érosion				Canevas de points	Jet à vitesse rapide	Jet d'eau envoyé au hasard	Érosion rapide par jet d'eau
Nbr de capil.	24	36					
Nbr. De goutte par capil.	6 à 7				1	820	
Diamètre des gouttes (mm)	1,8 à 2,0	2,0	1,2-1,6-2,0	2,0		2 à 10	
Vitesse de l'éch. (m/s)	44,7 à 402	128 à 178	300	Fixe	Fixe	Fixe	Fixe
Vit. des gouttes (m/s)				180	90 à 1000	0,08 à 0,25	0.2
Échantillon	Mini profil aérodyna- mique	Éch. circ. de 25 mm de dia. et 2 mm épai.	Coupons circulaires	Coupons rectan- gulaires	Coupons rectan- gulaires	Coupons rectan- gulaires	Coupons rectan- gulaires
Taux de précipitation (mm/h)	25,4	25,4	1,4 à 25	25,4			
Fréquen. rota. disque (Hz)				20			
Fréquence d'impact (Hz)				40			
Diamètre de la buse (mm)				0,8	0,4 à 1,6		0.457
Pression d'eau (MPa)				32,5			241
Dist. éch.-buse (mm)				60			5

Afin de satisfaire la norme AMS-C-83231A [16], notre montage doit répondre aux conditions de gouttes de 2 mm de diamètre avec un taux de précipitation de 25,4 mm/h.

Tobin, Young et al., ont comparé les résultats entre deux montages à bras tournants, le WARER et celui de SAAB Technologie et un montage à jet d'eau, le PJET sur un même revêtement où ils ont fait ressortir une corrélation entre les résultats des deux types de montages [19]. Le revêtement étudié a été déposé sur un alliage d'aluminium AA2024. La corrélation obtenue entre le montage à bras tournant WARER et le montage à jet d'eau PJET est de 8 minutes pour 1000 impacts. Tandis que la corrélation obtenue entre le montage à bras tournant SAAB et le montage à jet d'eau PJET est de 5,7 minutes pour 1000 impacts. En plus, une corrélation a également été remarquée entre les deux montages à bras WARER et SAAB donnant 30 minutes comparativement à 35 minutes respectivement. Sur la base des mesures topographiques, les trois montages montrent des changements de morphologie similaires avec l'augmentation de la durée de l'essai. Cette étude a démontré que des résultats comparatifs peuvent ainsi être obtenus avec les deux types de montage. [19]

Les mêmes chercheurs ont comparé les résultats entre le montage à bras tournant WARER et le montage à jet d'eau PJET sur un deuxième revêtement déposé sur un alliage d'aluminium AA2024. La corrélation obtenue est de 15 minutes pour le temps de tenue pour le montage à bras tournant, correspondant à 1000 impacts pour le montage à jet d'eau. Pour les montages à jet d'eau, l'impact est concentré sur un seul point, contrairement aux montages à bras tournant où la zone d'impact est 500 fois plus grande. Toutefois, il a été démontré que le ratio de corrélation n'est pas proportionnel, c'est-à-dire que 30 minutes de tenue ne correspondent pas à un taux d'érosion de 2000 impacts, en raison des valeurs de rugosité de surface des échantillons qui divergent entre les montages. Enfin, l'érosion est obtenue à 120 minutes pour le WARER et à 6000 impacts pour le PJET. [3]

2.5 Tribologie

2.5.1 Introduction

La perte d'énergie causée par le frottement, inévitable dans la plupart des mécanismes, représente jusqu'au tiers de la consommation d'énergie mondiale [29]. Pour réduire l'usure prématurée des composantes dans le domaine manufacturier et ainsi augmenter leur durée de vie, on a besoin d'étudier la science de la tribologie. Pour les ingénieurs, le frottement est une grande nuisance. En effet, le frottement est la cause principale de la perte d'efficacité des systèmes et de l'usure par la perte de matière. Par contre, on en a besoin, avec les embrayages et les freins, où le frottement et la traction jouent un rôle vital dans le bon fonctionnement de la machine [29].

La tribologie du grec *tribos* qui signifie frottement, est la science qui étudie les frottements et leurs effets sur des surfaces en contact par déplacement relatifs, en relation avec leurs caractéristiques [30]. Ce domaine de la science est relativement récent. Le mot a été utilisé pour la première fois en 1966, en Grande-Bretagne pour désigner l'ensemble des sciences et des techniques qui s'intéressent au frottement, à la lubrification ainsi qu'à l'usure des surfaces en contacts et en déplacements relatifs [29-31]. La tribologie, qui est d'une grande importance technologique, couvre de nombreuses disciplines appartenant à la physique, à la chimie, à l'ingénierie mécanique et à la science des matériaux [32]. Cependant, la prédiction exacte de l'usure n'est possible que pour des cas particuliers et les modèles actuellement proposés ne permettent pas de transposer les taux d'usure d'un problème industriel à un autre. Il est évident que la durabilité d'un matériau ou d'un revêtement est une exigence prioritaire. Il ne faut pas confondre le taux d'usure et la durabilité. Le taux d'usure est caractérisé par une perte de matière en fonction de l'utilisation alors que la durabilité fait référence au temps d'utilisation pendant lequel la fonction est maintenue. Le frottement et l'usure ne sont pas directement des propriétés intrinsèques aux matériaux et les systèmes tribologiques sont en générale dépendant des conditions de pression et de vibration [30]. Les études effectuées en tribologie permettent de réduire l'usure des matériaux et ainsi d'augmenter la durée de vie et la fiabilité des systèmes mécaniques et mécatroniques [31].

Le système tribologique, ou tribo-système, contient deux ou plusieurs surfaces en contact soumises à des mouvements relatifs. Il est contrôlé par trois facteurs :

1. Mécaniques : force, vitesse, nature du contact, mode de mouvement;
2. Matériaux : composition chimique, microstructure, module et limite d'élasticité, résistance à la rupture, ductilité, sensibilité à la vitesse de sollicitation, point de fusion;
3. Environnement : température, humidité relative, activité chimique.

De nos jours, la tribologie s'est approfondie et se concentre principalement sur les interfaces. La tribologie des interfaces présente différemment l'usure et le frottement sur le plan microscopique. Elle remet en cause les processus classiques d'usure et elle propose comme substitut un enchaînement plus complexe des processus suivants :

- Détachement des particules des matériaux;
- Piégeage de ces particules formant un lit à l'interface;
- Établissement d'un régime stationnaire de détachement et d'élimination de ces particules.

2.5.2 Érosion par particules solides

L'érosion par particules solides est définie comme étant la perte de matière d'une surface au contact d'un fluide en mouvement contenant des particules solides [30]. L'usure résulte donc uniquement des chocs entre des particules solides et la surface d'un matériau. La masse perdue sous l'action des particules érosives dépend de deux processus d'usure :

1. Par frottement
2. Par chocs

Par exemple, des études ont montré que la perte de matière sur des aciers de différentes duretés donnait des résultats comparables. Si les aciers durs présentaient une meilleure résistance au frottement, les aciers tendres résistaient mieux aux chocs. L'usure par érosion W_E est définie par l'équation suivante :

$$W_E = \frac{\text{masse perdue d'échantillon}}{\text{masse des particules projetées}} \quad (2)$$

Si la vitesse d'impact croît, la perte de masse W_E s'accroît. Pour les matériaux ductiles, comme les aciers doux, une répétition des impacts produit une déformation plastique en surface créant une rugosité microscopique. La déformation plastique dans cette zone va créer des fissures, les impacts répétés provoquant l'arrachement de matière. Pour les matériaux fragiles, comme l'acier trempé, l'enlèvement de matière dépend des fissurations créées au voisinage de la surface. La création et la propagation des fissures dues aux chocs sont plus importantes lorsque la direction de l'impact est perpendiculaire à la surface, occasionnant ainsi un taux d'érosion plus grand. [30]

La taille des particules du jet érosif ainsi que leur angle d'attaque peuvent modifier le comportement ductile-fragile d'un matériau. La **Figure 22** montre le taux d'érosion de particule de 9 et de 21 μm frappant une plaque de verre en fonction de l'angle d'attaque. De façon générale, plus la taille des particules est élevée, plus le taux d'érosion est grand. Toutefois, pour les petites particules de 9 μm , le taux d'érosion est maximum à un angle d'attaque de 30° et moindre que celui-ci lorsqu'ils sont projetés à un angle de 90°. Au contraire, pour des particules de taille plus grande de 21 μm , le taux d'érosion augmente linéairement avec l'angle d'attaque et le maximum est observé à un angle d'attaque de 90°.

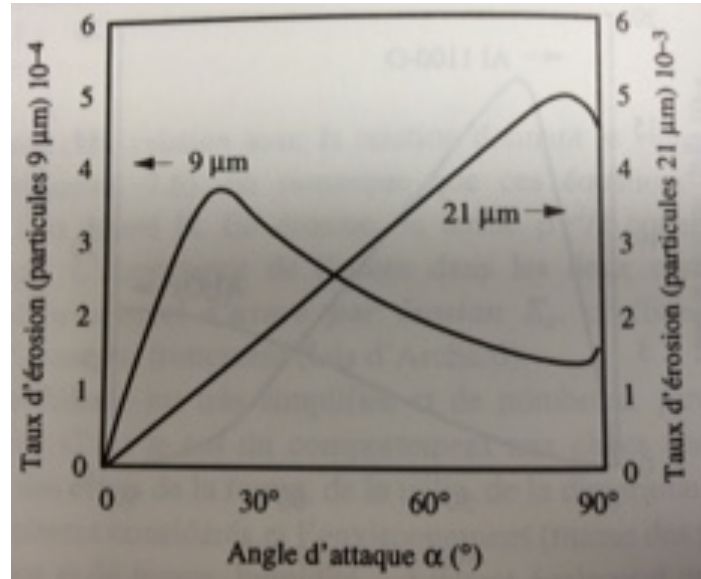


Figure 22: Taux d'érosion en fonction de l'angle d'attaque pour des particules de 9 et 21 μm [30]

Le rapport entre la dureté des particules et celle de la surface érodée est un paramètre qui semble contrôler l'érosion. L'érosion produite par une particule dure est plus grande que celle produite par une particule tendre. Une particule de forme asymétrique et angulaire est plus érosive qu'une particule sphérique. [30]

2.5.3 Érosion par particules liquides

L'érosion par particules liquides est définie comme étant la perte de matière produite par un jet d'eau ou des gouttes de pluie, le processus étant comme suit. Lorsqu'une goutte d'eau frappe une surface libre ou l'interface de deux matériaux différents, il se produit une onde de choc qui se propage sur toute la surface. Pour un matériau recouvert d'un revêtement comme illustré à la **Figure 23**, la contrainte créée par l'onde de choc se propage d'abord sur le revêtement pour s'atténuer ensuite à l'intérieur. De plus, deux ondes de pression sont donc produites à l'interface entre le revêtement et le substrat : une retournée dans le revêtement et l'autre transmise à travers le substrat [7].

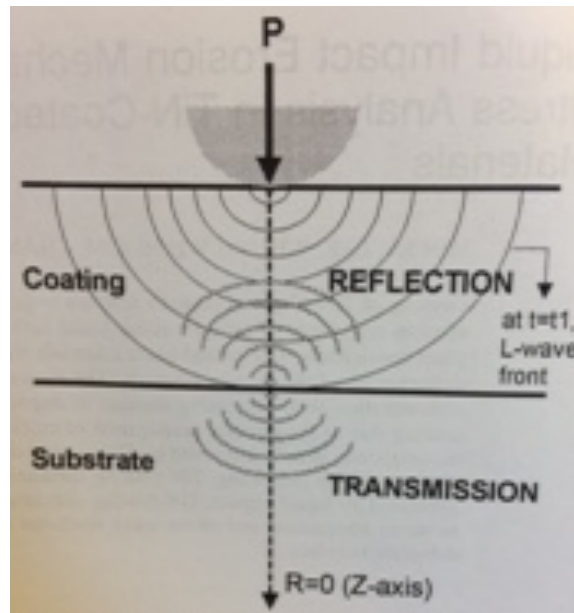


Figure 23: Réflexion et transmission de l'onde de pression [7]

L'onde de pression réfléchi dans le revêtement réagit en même temps que l'onde de pression se déplaçant à l'interface. Il est très difficile d'analyser les contraintes qui sont générées par ces ondes de pression qui dépendent de l'angle d'incidence et des phénomènes qui se produisent à l'interface. [7]

Les déformations produites par l'impact d'un liquide apparaissent comme des dépressions isolées, dont la densité augmente avec le nombre d'impacts. Le mécanisme de rupture des revêtements a déjà été expliqué à la Erreur ! Nous n'avons pas trouvé la source du renvoi. de la section 2.1. Le revêtement commence par se déformer plastiquement où il forme une cavité. Lorsque le nombre d'impacts augmente, la dépression se creuse, ce qui augmente son rayon de courbure et crée des fissurations amenant le décollement. [7]

2.5.4 Facteurs influant le taux d'érosion par particules solides et liquides

Les propriétés les plus importantes susceptibles d'affecter la résistance à l'érosion des revêtements sont les suivantes :

- La dureté;
- La capacité de durcissement par travail à froid;
- La rigidité.

Plusieurs études ont permis d'évaluer l'effet général de ces propriétés sur la résistance à l'érosion. Par exemple, la résistance à l'érosion des revêtements augmente linéairement avec la dureté. Par contre, lorsque l'angle d'attaque est élevé, cet effet devient moins important. En général, pour être en mesure de bien résister à l'érosion, les revêtements doivent avoir une bonne capacité de déformation. En conséquence, un revêtement de faible dureté qui possède une grande capacité de déformation et de durcissement peut présenter une résistance à l'érosion supérieure à celle d'un revêtement de plus grande dureté. [1]

La vitesse des gouttes U lors de l'impact constitue l'un des paramètres les plus influents sur le taux d'érosion. Cependant, les métaux et les céramiques ne répondent pas de la même façon à une variation de vitesse. Le taux d'usure est fonction de la vitesse d'impact et est représenté par la relation suivante :

$$\text{taux d'usure} = kU^n \quad (3)$$

Où k représente le coefficient d'usure et n l'exposant de la vitesse. L'exposant n dépend du type de matériau utilisé. Pour les métaux, la valeur de n se situe entre 2,0 et 2,5 alors que pour les céramiques, elle varie entre 2,5 et 3,0. La **Figure 24** montre la relation entre le taux d'érosion et la vitesse des particules frappant des matériaux fragiles et ductiles pour un impact à 90°. [1]

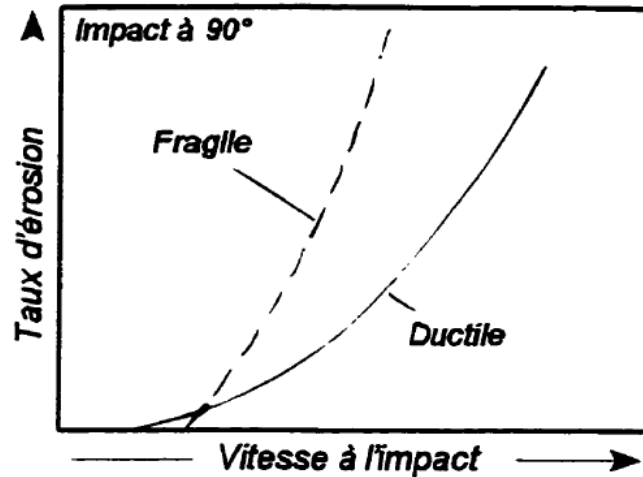


Figure 24: Taux d'érosion en fonction de la vitesse d'impact pour un matériau ductile et un fragile [1].

L'angle d'impact est aussi un facteur influant sur le taux d'érosion. Une étude effectuée sur différents aciers ductiles a montré que le taux d'érosion augmente avec l'angle d'impact [1]. Toutefois, à vitesse élevée, un maximum d'érosion est observé à un angle intermédiaire d'environ 45°. Cela signifie que l'angle d'impact ne peut à lui seul prédire le taux d'érosion [1].

CHAPITRE 3

APPAREILLAGE ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAUX

3 APPAREILLAGE ET PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une description des méthodes et des appareils utilisés pour le développement du montage. Il est divisé en quatre sections, soit : la détermination des composantes du montage répondant aux besoins et aux limites du laboratoire, leur fonctionnement, la validation du montage et le protocole d'essai.

3.2 Composantes du montage

Le type d'appareil a été développé en référence au montage de type jet d'eau, semblable au PJET présenté à la section 2.3.1 illustré à la **Figure 7**. Ce type d'appareil a été choisi en raison des résultats disponibles dans la littérature, qui sont reproductibles et bien documentés [3, 19-22]. De plus, les montages à jet d'eau exigent moins d'espace et sont plus sécuritaires que les montages à bras tournant. Le montage a été construit en se basant sur la norme ASTM [10]. Le protocole d'essai élaboré est basé sur la norme standard AMS-C-8323/1A [16].

Pour mesurer l'adhérence de la glace, des lames d'aluminium 6061-T6 sont utilisées comme échantillon, comme celles illustrées à la **Figure 25**. Afin de pouvoir facilement évaluer avec le même échantillon l'adhérence de la glace et la résistance à l'érosion, il a été convenu de développer l'essai d'érosion en utilisant les mêmes échantillons.

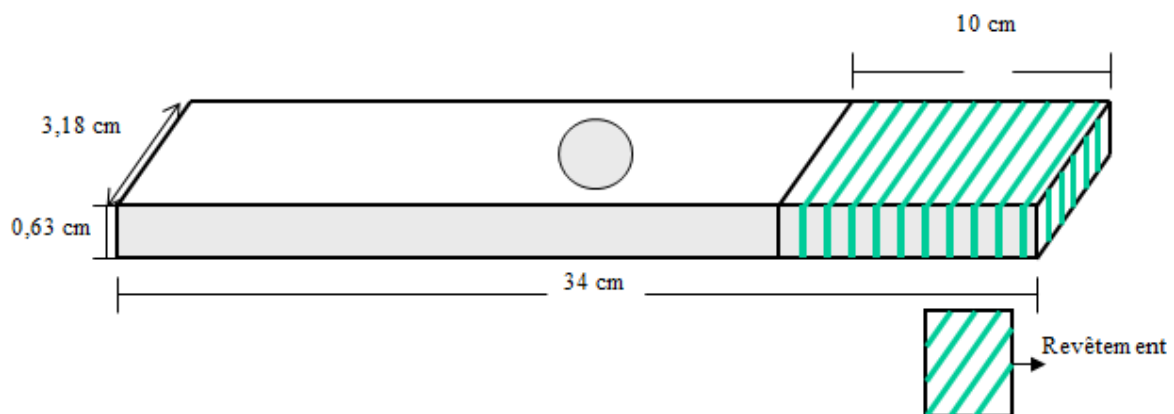


Figure 25: Lames d'essais pour l'adhérence de glace et l'érosion par la pluie

L'essai développé est comparatif et permet de développer les revêtements en comparant les taux d'érosion mesurés avec ceux de résistance à l'érosion connu.

La **Figure 26** représente le schéma du montage à jet d'eau construit au LIMA. Pour simuler une goutte de pluie, le jet est projeté par la buse B à travers les orifices du disque tournant à 120 tours par minute, simulant ainsi une goutte de pluie P. Au terme de sa course, la goutte de pluie simulée vient frapper la lame échantillon L recouverte du revêtement.

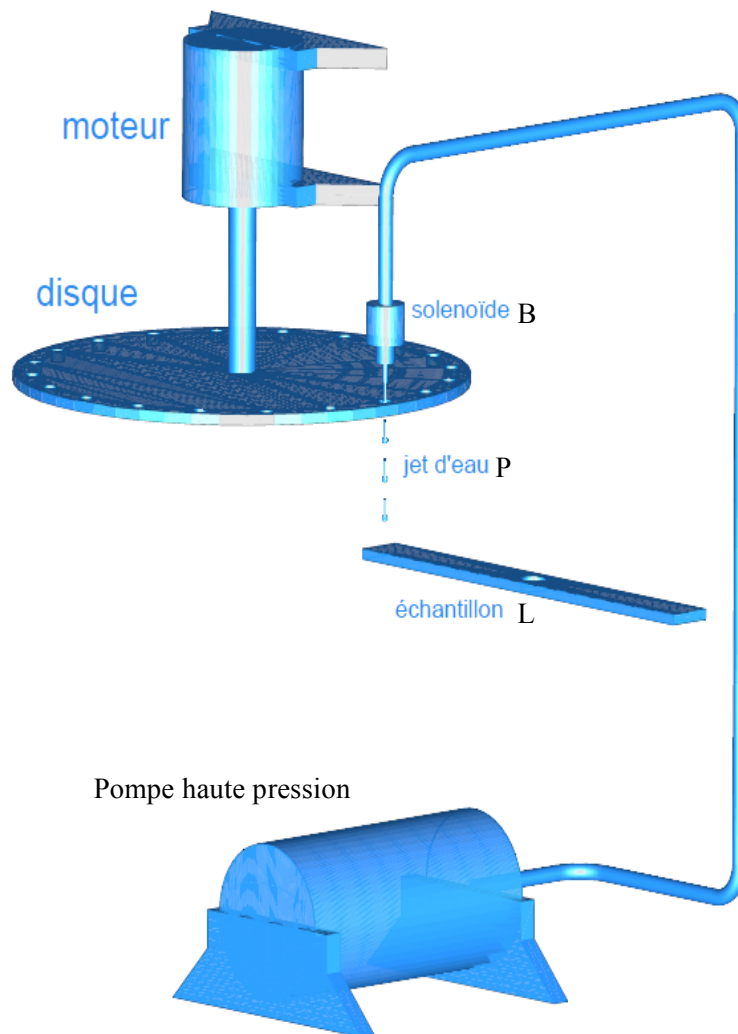


Figure 26: Schéma du montage à jet d'eau développé au LIMA.

La résistance à l'érosion par la pluie est mesurée par le nombre d'impacts avant l'apparition de dommage visible sur le revêtement. La **Figure 27** reproduit la partie recouverte de la lame échantillon exposée, montrant sur l'axe des x les cinq positions a , b , c , d et e et sur l'axe des y , le nombre d'impacts à subir à chaque position, ce dernier débutant à 20 et se terminant à 10 000 impacts.

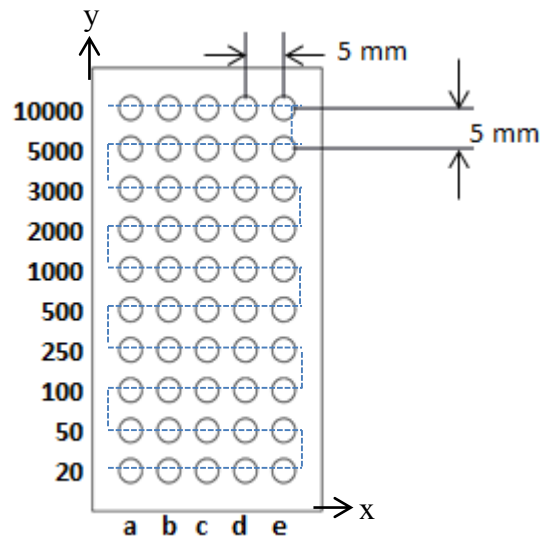


Figure 27: Partie de la lame exposée aux sites d'impacts des gouttes

Les chiffres identifiant les 10 rangées allant de 20 à 10 000 correspondent au nombre d'impacts tandis que les lettres a , b , c , d et e identifient chacune des positions ou sites d'impacts où les gouttes sont projetées. Le chemin suivi par le jet est illustré par la ligne pointillée pour chacune des 10 rangées. L'incrémentation du nombre d'impacts par rangées varie en fonction de la résistance du revêtement évalué. Après avoir fixé la lame échantillon sur le support, l'essai débute lorsqu'elle est déplacée sur un plan x et y de façon à balayer la partie recouverte selon un parcours commençant à la première rangée 20 au point a et se terminant au point e . Sur cette rangée, 20 impacts à chaque position (site d'impact) sont effectués. Au bout de la rangée 20, un total de 100 impacts ont été effectués. Par la suite, le support accède à la seconde rangée où 50 impacts sont effectués au point e pour se terminer au point a . Sur cette rangée, 50 impacts sont effectués aux cinq positions pour un total de 250 impacts. Par la suite, l'échantillon est déplacé à la rangée 100, la surface du revêtement étant balayée du point a au point e . Dans cette

rangée, un total de 500 impacts sont effectués soit 100 impacts par position. Ainsi de suite, le revêtement est balayé jusqu'à la rangée 10 000 en allant du point *e* au point *a*. À la rangée 10 000, un total de 50 000 impacts ont été effectués, soit 10 000 par position. Cela représente donc pour chacune des rangées un total de cinq répétitions (*a-b-c-d-e*) pour s'assurer de la reproductibilité de l'essai. Pour chaque revêtement candidat, entre deux et six échantillons différents sont évalués.

3.3 Construction du montage

Les photos montrées aux **Figures 28 à 33** sont celles du montage fabriqué au LIMA où chaque composante identifiée par un chiffre est détaillée aux **Tableaux 3 à 8**. Le montage a été fabriqué à partir d'une fraiseuse (1), cette dernière disposant d'un porte-échantillon dont les déplacements sur le plan *x* et *y* pouvaient être positionnés par un ordinateur (26) sur chacun des sites d'impacts. Dans ce montage, un jet d'eau est projeté vers le bas par une buse (19) de 0,8 mm de diamètre, à l'aide d'une pompe à haute pression (6) entraînée par un moteur électrique (7) de 5 Hp. Le jet d'eau est par la suite entrecoupé par un disque en aluminium 6061-T6, tournant à 120 tours par minute (17), où il passe par les 20 orifices de 10 mm de diamètre. Pour simuler la goutte requise par la norme AMS-C-83231A [16], la distance séparant la buse et l'échantillon doit être de 60 mm [20-22]. Un distributeur d'air comprimé (23) muni d'un régulateur de pression (22) permet d'éliminer tout surplus d'eau sur l'échantillon. Le montage comprend également un protecteur (15) ainsi qu'un bac de récupération de l'eau évacuée (2). Deux interrupteurs, un de départ (2) et un de fin de course (4), sont installés à des fins de sécurité. L'essai est exécuté par un logiciel adapté (26) effectuant les différents contrôles de l'appareil.

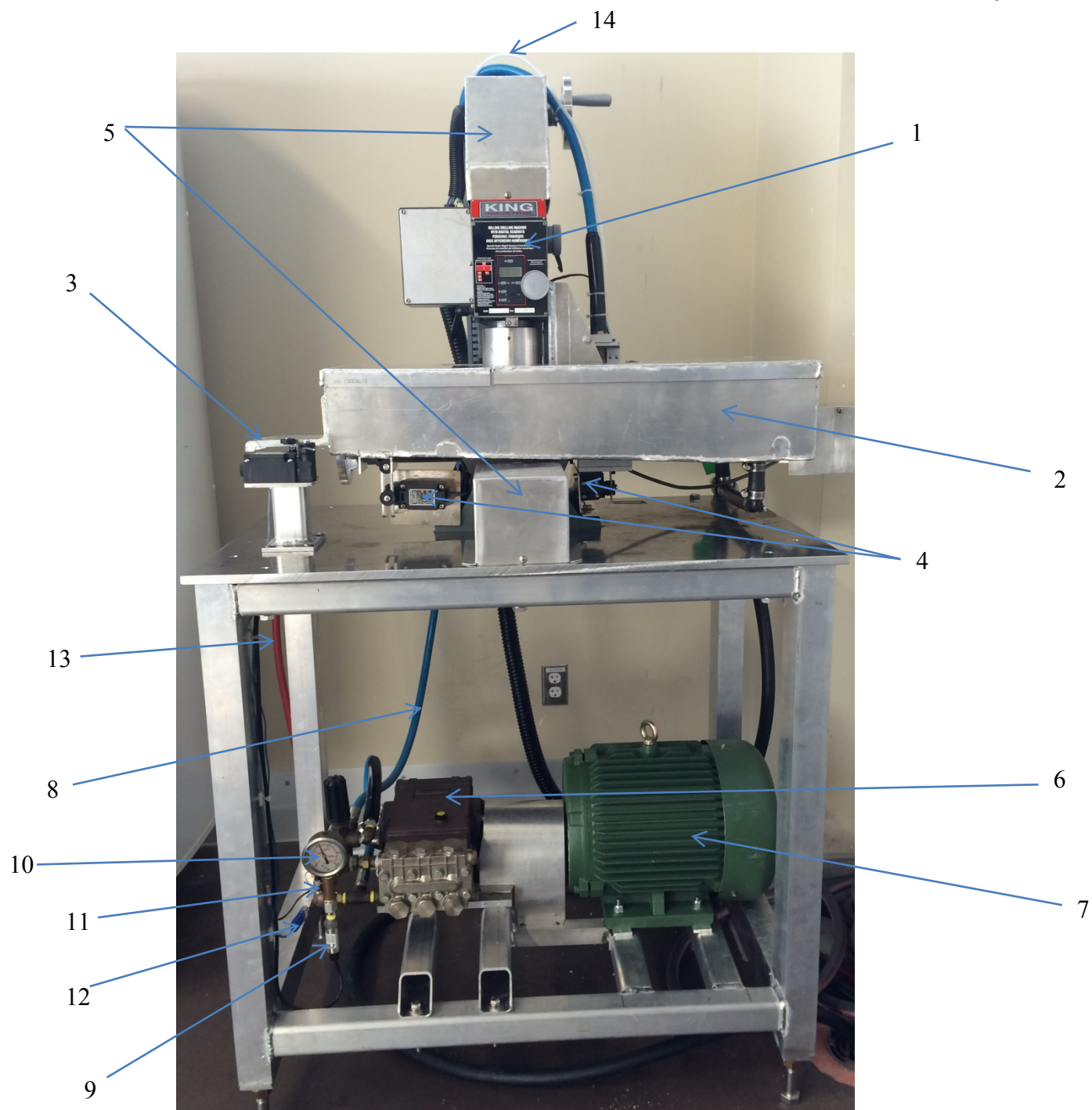


Figure 28: Présentation du montage d'érosion par la pluie

Tableau 3: Composantes utilisées pour le montage d'érosion par la pluie (Figure 28)

No	Composantes	Fournisseur	Marque	Modèle
1	Fraiseuse	Groupe sabec	King Canada	KC-20VS
2	Bac de récupération des eaux, alu. 6061-T6	LIMA	N/D	N/D
3	Interrupteur du point initial de départ	Automation direct	Automation direct	ABP2H51Z11
4	Interrupteur de fin de course (Sécurité)	Automation direct	Automation direct	ABP2H51Z11
5	Moteur pas à pas	Automation direct	Automation direct	
6	Machine à pression 0-20684 kPa à 15 L/min	LIMA	General pump	T2011
7	Moteur électrique de 5 Hp de la pompe haute pression	Automation direct	Ironhorse	
8	Tube de pression 0-27579 kPa	Hydro mac	Good year	N/D
9	Transducteur de pression 0-20684 kPa	Omega	Omega	PX309-3KG5V
10	Manomètre 0-34474 kPa	LIMA	N/D	N/D
11	Solenoïde valve	Omega	Omega	SV8coil-24vdc
12	Thermocouple type T			
13	Boyau d'alimentation	DDM	Topring	N/D
14	Tube de polyuréthane	Rona	N/D	N/D



Figure 29: Présentation du montage d'érosion par la pluie (emplacement de la lame échantillon)

Tableau 4: Composantes utilisées pour le montage d'érosion par la pluie (emplacement de la lame d'essai) (Figure 29)

No	Composantes	Fournisseur	Marque	Modèle
15	Protecteur, aluminium 6061-T6	LIMA	N/D	N/D
16	Joint d'étanchéité contre retour d'eau	Wajax	Timken	44x60x7
17	Disque de 33 cm en alu. 6061-T6, 20 trous de 10 mm de dia.	LIMA		
18	Arbre pour tenir le disque sur la fraiseuse	Travers Tools	KBC	67-600-020
19	Buse 0,8 mm			
20	Solénoïde valve	Cole parmer	Parker	099-0631-900

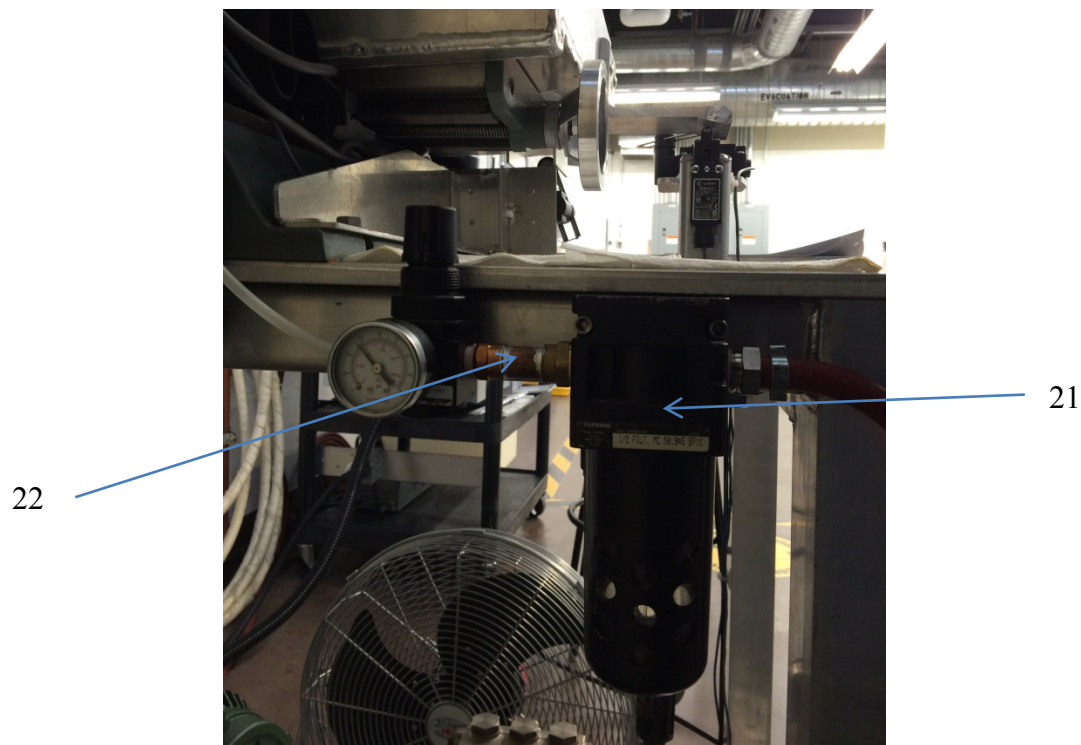


Figure 30: Filtreur (21) et régulateur de pression (22)

Tableau 5: Composantes montrées à la Figure 30

No	Composantes	Fournisseur	Marque	Modèle
21	Filtreur	LIMA	Topring	50,945
22	Régulateur de pression 0-862 kPa	LIMA	Topring	50,32

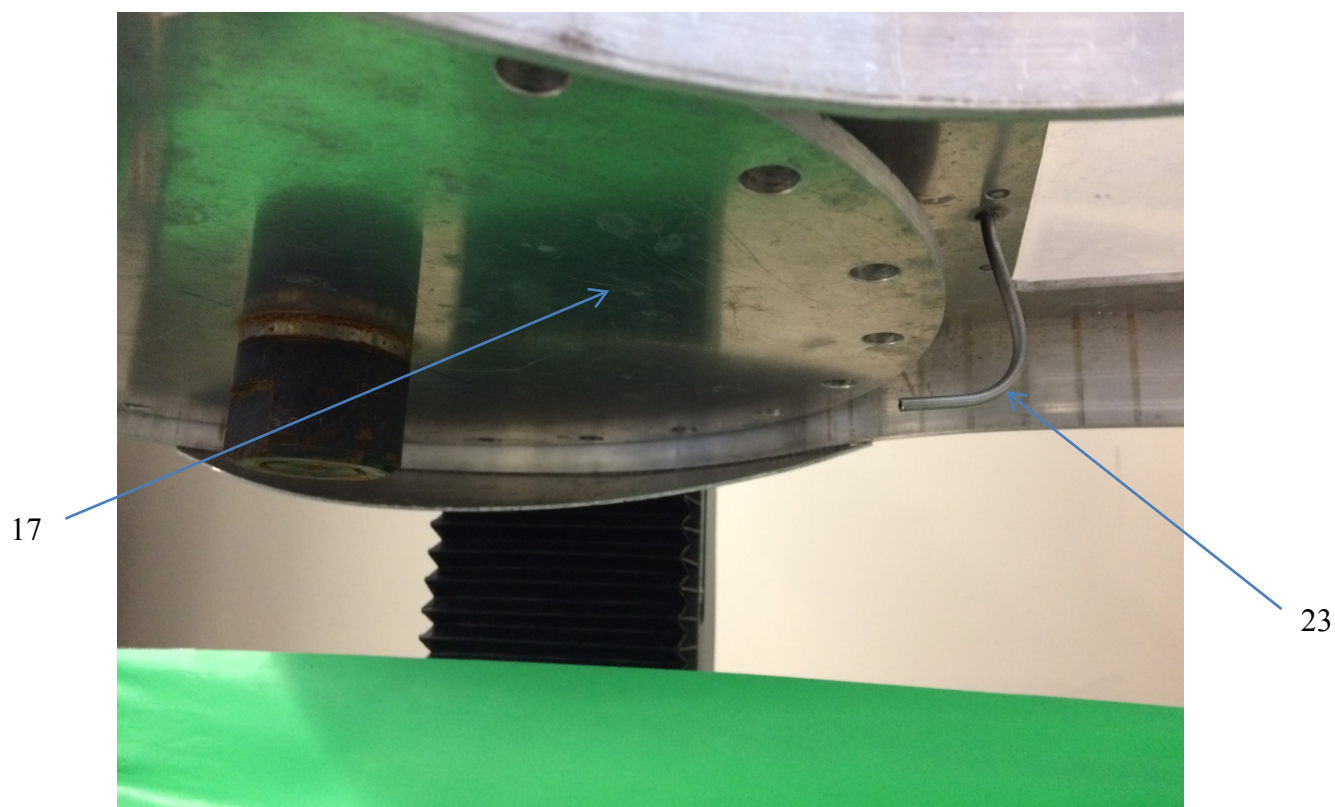


Figure 31: Disque rotatif (17) et tube de sortie d'air (23)

Tableau 6: Composantes montées à la **Figure 31**

No	Composantes	Fournisseur	Marque	Modèle
17	Disque de 33 cm en alu. 6061-T6, 20 trous de 10 mm de dia.	LIMA		
23	Tube de sortie d'air	Swagelock	Swagelock	N/D

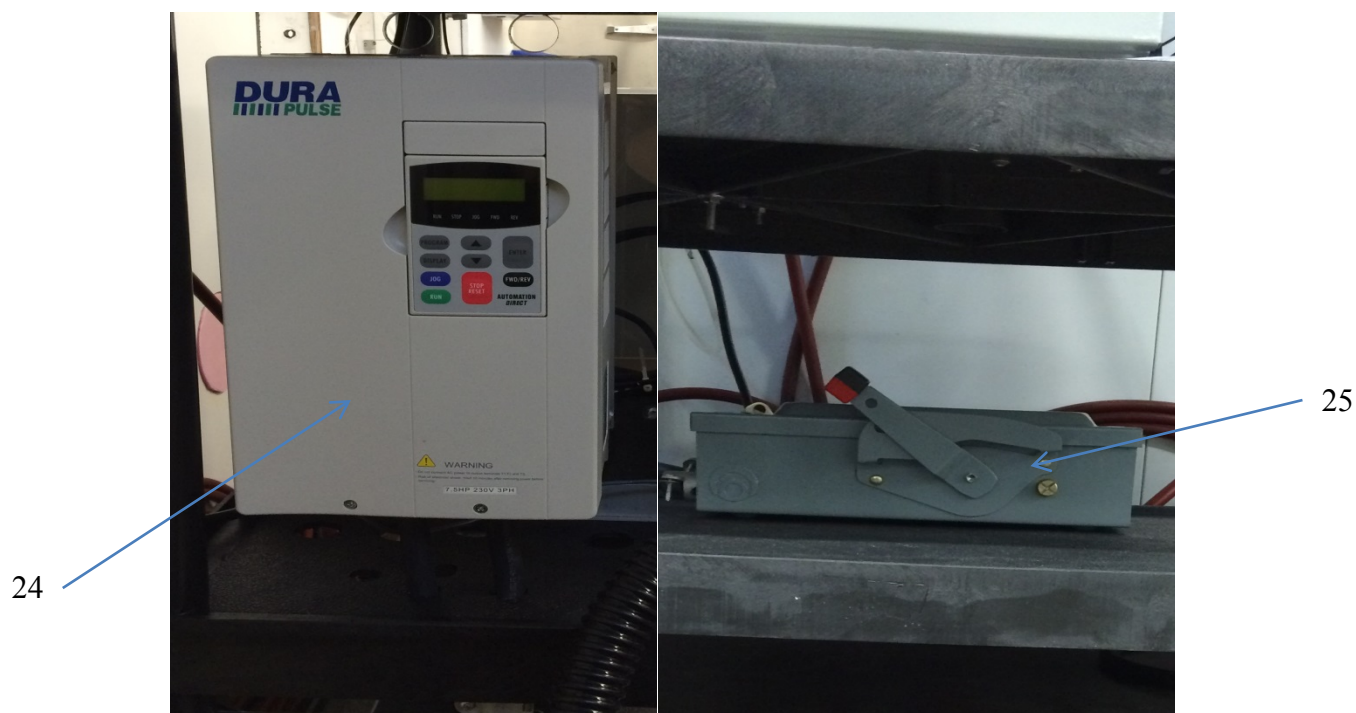


Figure 32: Variateur de fréquence (24) et sectionneur d'alimentation (25)

Tableau 7: Composantes montrées à la Figure 32

No	Composantes	Fournisseur	Marque	Modèle
24	Variateur de fréquence	Automation direct	dura pulse	GS3-27P5
25	Sectionneur d'alimentation	Franklin empire	siemens	

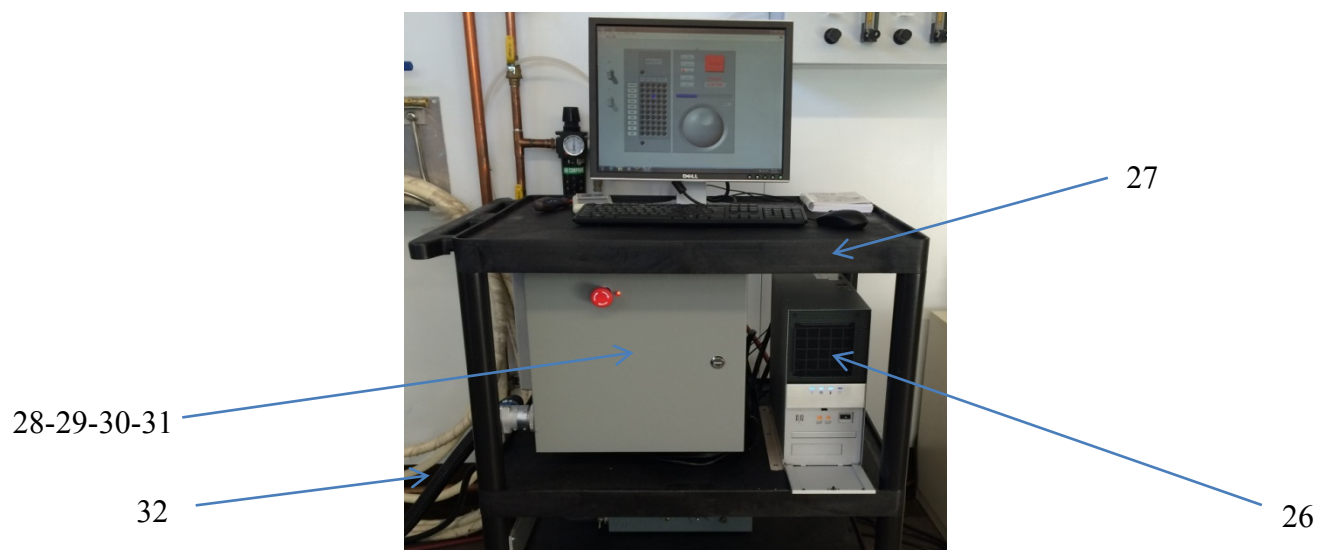


Figure 33: Chariot de transport

Tableau 8: Composantes utilisées pour le chariot de transport (Figure 33)

No	Composantes	Fournisseur	Marque	Modèle
26	Ordinateur	UQAC		
27	Chariot en plastique	U-line		
28	Boîtier en acier	Automation direct	Automation direct	N1C081004
29	Contrôleur du moteur pas à pas	Automation direct	Automation direct	STP-DRV-6575
30	Contrôleur d'axe pas à pas	National instrument	National instrument	778916-04
31	Bornier de connexion	National instrument	National instrument	777978-02
32	Câble de 2m	National instrument	National instrument	186380-02

Les différentes incertitudes présentées correspondent aux incertitudes des appareils de mesure utilisés. Le montage produit des jets d'eau pulsés à une fréquence de 40 Hz à une pression de $14\,824 \pm 250$ kPa [20-22]. Après le passage à travers l'orifice du disque tournant à 120 tours par minute, le segment du jet est considéré géométriquement similaire à une goutte de pluie de 2 mm lorsqu'il frappe le revêtement [20-22]. Il a été impossible de prendre une photographie de la goutte traversant l'orifice du disque tournant en raison des éclaboussures abondantes durant l'essai. L'incrémentation du nombre d'impacts par rangée peut varier en fonction du niveau de résistance du revêtement évalué. Les temps ON-OFF identifiés à la **Figure 34** retenus pour le contrôle de la fréquence du jet pulsé sont fonction de la distance linéaire entre deux orifices (35 mm), de leur diamètre (10 mm), de leur éloignement du centre du disque rotatif ainsi que de la vitesse de rotation du disque.

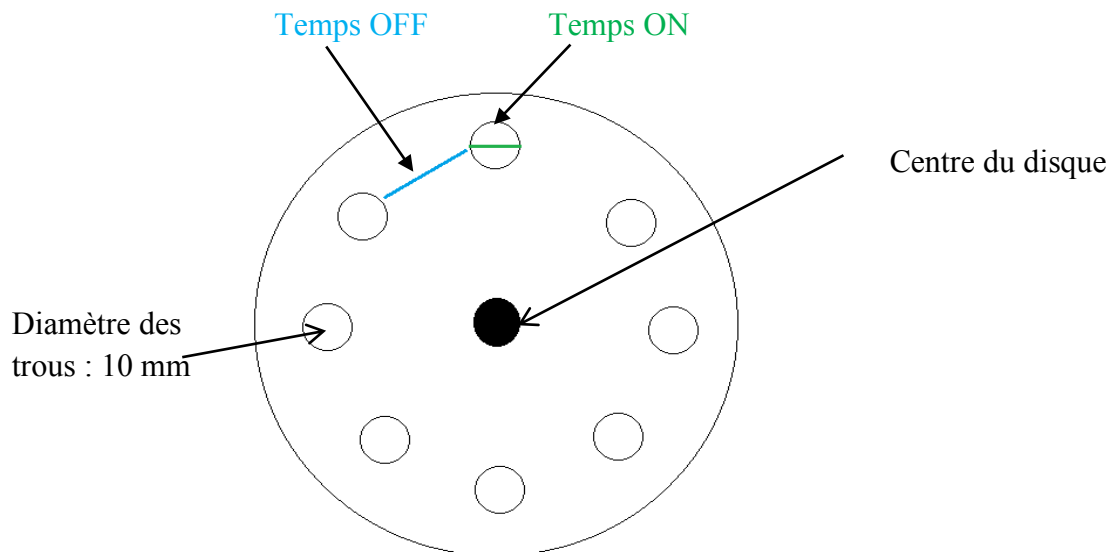


Figure 34: Distance entre deux orifices dont dépendent les temps ON et OFF

Les temps ON-Off sont spécifiques au disque rotatif, c'est pourquoi ils ne peuvent être ajustables que sur un seul disque. Même si la valeur de la pression est ajustable entre 0 et $17\,237 \pm 250$ kPa, la pression retenue pour le montage est de $14\,824 \pm 250$ kPa [20-22], de façon à satisfaire la norme. La distance entre la buse et l'échantillon est ajustable de 55 à 70 mm, mais la distance retenue est de 60 ± 1 mm. La pression d'air est ajustable entre 0 et 689 ± 10 kPa, mais la valeur retenue est de 296 ± 10 kPa. Ces dernières valeurs ont été établies à partir de celles proposées dans l'article décrivant le PJET [3]. Afin de produire des gouttes de 2 mm projetées à une vitesse de jet d'eau de 180 m/s avec une buse de 0,8 mm, le débit d'eau doit être de 5,4 L/min, ce dernier étant calculé à l'aide de la relation suivante [33] :

$$v = 4 \frac{q}{\pi d^2} = 1,273 \frac{q}{d^2} \quad (4)$$

où

v = vitesse de sortie de l'eau (180 m/s)

q = débit d'eau (m^3/s)

d = diamètre de la buse (0,0008 m)

Ce qui donne un débit d'eau égale à $9 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ou 5,4 L/min.

3.4 Validation du montage

La validation du montage s'est faite en trois étapes, la première étant l'établissement du protocole d'essai, suivi de la calibration pour terminer avec une étude de la détermination de la sensibilité et de la reproductibilité des résultats. Pour cette dernière étape, quatre revêtements allant de très résistant à faiblement résistant à l'érosion ont été évalués en même temps que trois différents revêtements fournis par l'industrie.

3.4.1 Protocole d'essai

Le protocole d'essai est divisé en quatre sections. La première section fait référence à la fabrication des lames échantillons. La section suivante concerne la préparation des échantillons qui comprend le nettoyage, l'identification, l'expédition au

client pour l'application du revêtement et la préparation des lames d'essai. La troisième section permet de préparer le montage pour l'évaluation des échantillons. La dernière section permet d'évaluer les résultats obtenus à l'aide d'un microscope ainsi que d'une caméra. Le travail effectué pour établir le protocole d'essai n'est pas présenté pour des raisons de volume. Il est toutefois présenté à l'annexe 1.

3.4.2 Calibration

La calibration du montage a consisté à vérifier la stabilité des conditions de pression et de température de l'eau, ces dernières ayant été mesurées dans 36 essais sur les sept revêtements différents. Les histogrammes de la pression moyenne et la température moyenne de l'eau des 36 essais sont présentés aux **Figures 35** et **36**.

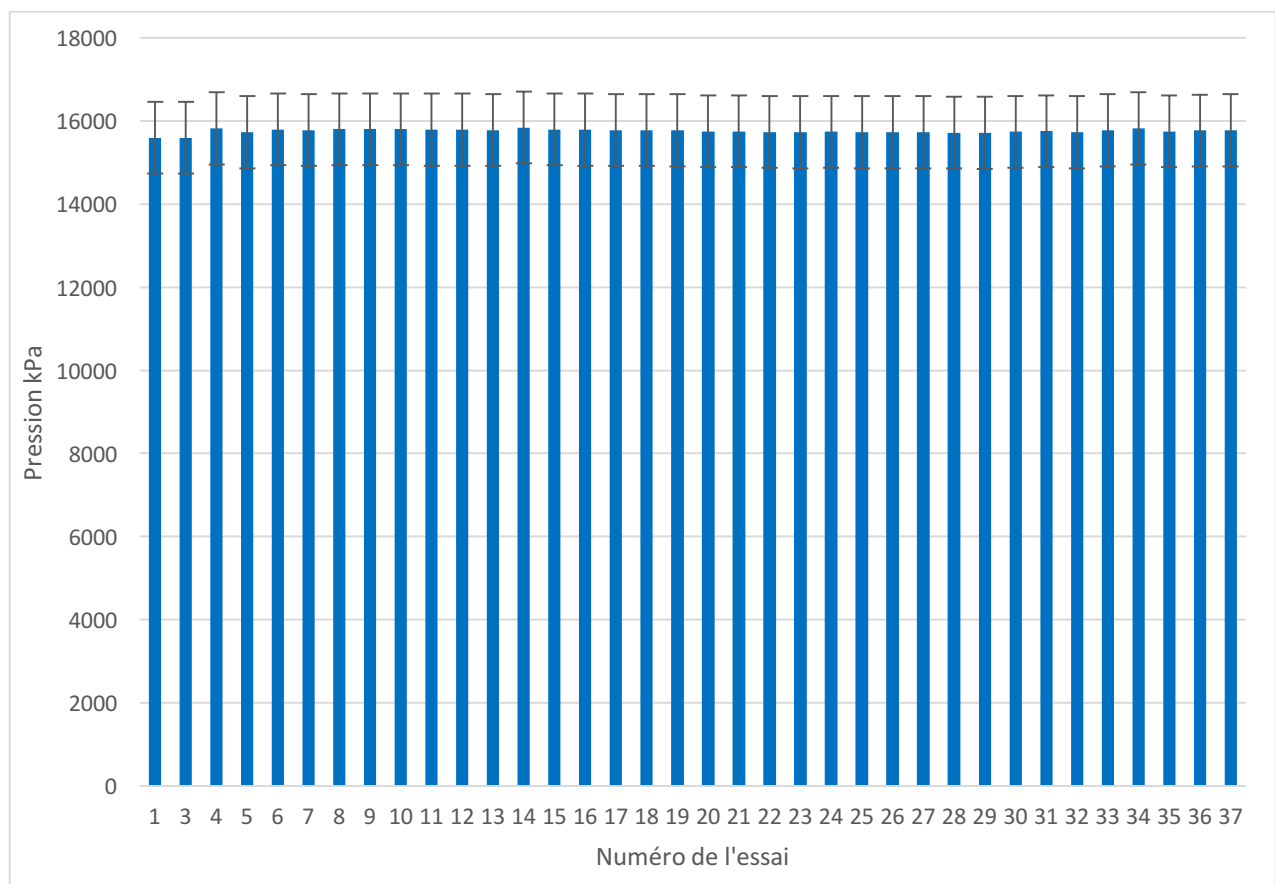


Figure 35: Histogramme des pressions moyennes de l'eau des 36 essais

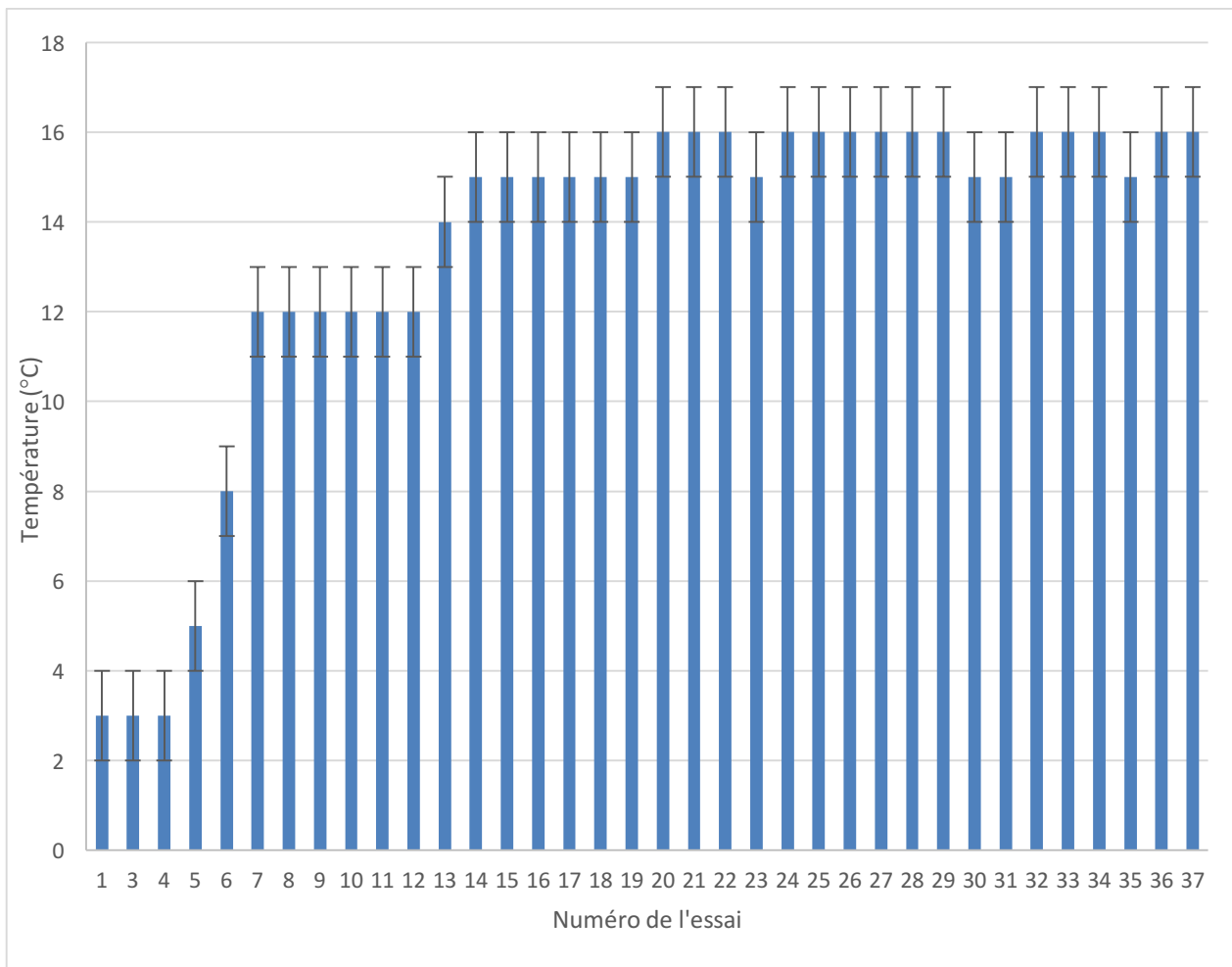


Figure 36: Histogramme des températures moyennes de l'eau des 36 essais

La pression moyenne de chaque essai varie entre 15 596 et 15 844 \pm 865 kPa et la température moyenne, entre 3 et 16 \pm 4 °C. Les valeurs moyennes de la pression et de la température de l'eau des 36 essais sont de 15 754 \pm 865 kPa et de 13 \pm 4 °C. L'incertitude des valeurs présentées correspondent à l'écart-type des données mesurées. Plusieurs essais ont été répétés dans les mêmes conditions de pression et de température afin de vérifier la robustesse du montage, ce qui a permis d'apporter des ajustements au logiciel de contrôle, de même que d'ajouter un pointeur physique soit un schéma placé à l'extérieur du montage afin d'indiquer l'endroit où le jet d'eau est projeté sur la lame échantillon et, ainsi, compter le nombre précis d'impulsions qui sont projetés sur l'échantillon.

3.4.3 Essai d'érosion avec une peinture d'avion répondant aux critères aéronautiques

Après la calibration, l'évaluation proprement dite du montage a été effectuée en vérifiant son bon fonctionnement ainsi que la reproductibilité des résultats. Pour ces essais, des revêtements courants, soit une peinture d'avion répondant à la norme aéronautique [16] ainsi qu'un revêtement glaciophobe, soit un époxyde à base d'eau (*Ecological Coating* EC-3100) ont été évalués. Les quatre premiers essais ont été effectués sur des échantillons d'une peinture d'avion satisfaisant à la norme aéronautique, afin de déterminer le nombre d'impacts nécessaire pour en causer l'érosion. Après l'essai, nous avons procédé à l'examen des sites d'impacts. À partir des données des trois derniers essais, le premier ayant été rejeté en raison du montage qui était non fonctionnel, il a été possible de déterminer le nombre moyen d'impacts nécessaire pour éroder un revêtement certifié standard; ce dernier ayant nécessité en moyenne $96\,600 \pm 5\,800$ impacts. Ce nombre peut alors être établi comme valeur de référence pour valider les futurs revêtements en développement. De plus, ces trois essais ont permis de démontrer que le montage produisait un niveau d'érosion assez élevé pour évaluer les revêtements quant à leur résistance à l'érosion.

3.4.4 Détermination du critère d'échec

À la suite de l'évaluation avec la peinture d'avions, des essais de répétabilité avec le revêtement glaciophobe ont été effectués pour établir le nombre minimal de répétitions pour avoir un échantillonnage représentatif. Au départ, il a été convenu d'effectuer un minimum de trois essais par revêtement et d'examiner chaque aire d'impact à l'aide d'un microscope (Microsystems DG 20). Ensuite, une photo de chaque site érodé a été prise à l'aide du même microscope. Après avoir pris ces photos, une photo de l'ensemble de l'essai est prise à l'aide d'une caméra (Canon EOS 70D) afin de présenter l'évolution de l'érosion sur le revêtement. L'analyse des traces laissées après l'impact des gouttes sur neuf échantillons du même revêtement a permis d'établir le critère d'échec suivant, à savoir qu'il doit y avoir au minimum quatre sites d'impact érodés sur cinq pour en juger l'échec. La **Figure 37** montre un exemple de l'application du critère d'échec aux six derniers échantillons du même revêtement glaciophobe, le rectangle rouge montrant le nombre d'impacts satisfaisant au minimum de quatre sites érodés sur cinq. La raison pour laquelle ce critère d'échec a été établi vient du fait qu'on obtient une meilleure

répétabilité des résultats. En effet, il arrive en cours d'essai qu'il y ait trois sites érodés sur une rangée alors que pour la rangée suivante où le nombre d'impacts est plus élevé, il y a seulement deux sites érodés. Par contre, lorsque qu'au moins quatre sites sur cinq sont érodés sur une même rangée, l'érosion des sites sur les rangées suivantes ne diminue pas sous les quatre sites érodés.

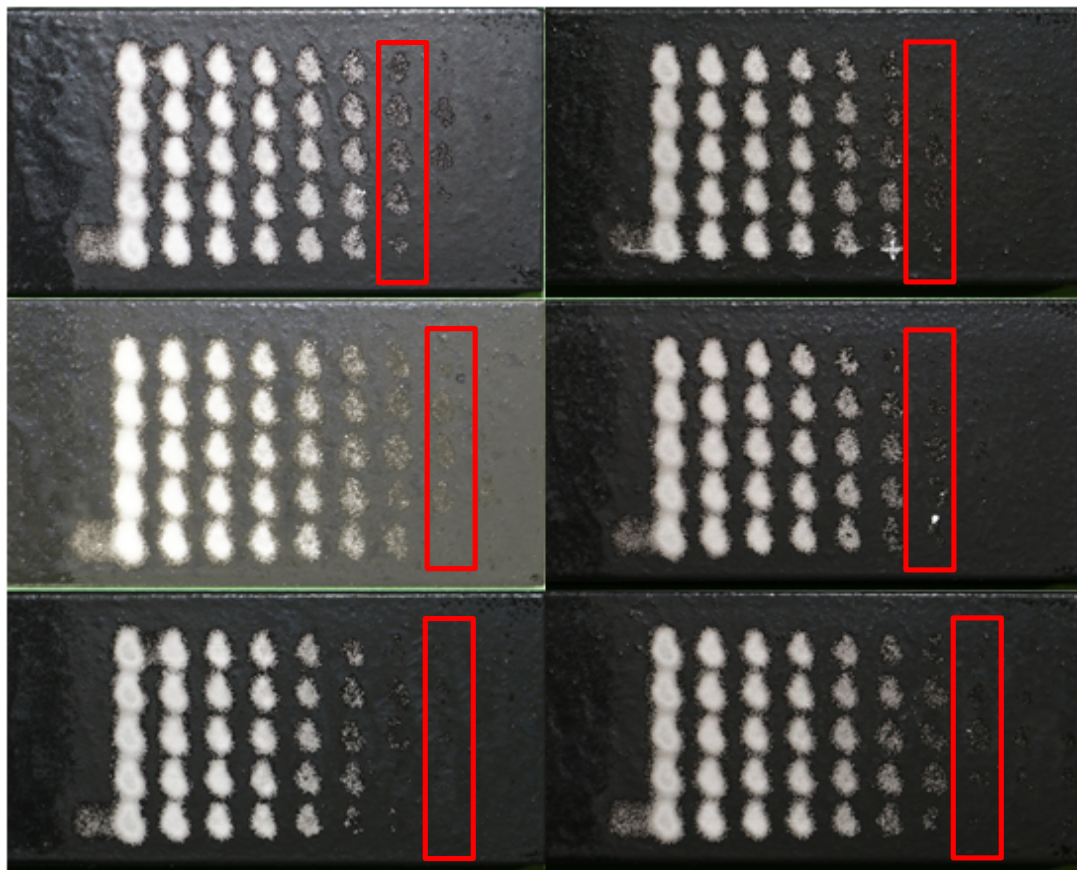


Figure 37: Application du critère d'échec aux 6 échantillons du même revêtement glaciophobe

3.4.5 Identification des revêtements évalués

Le **Tableau 9** identifie les quatre revêtements qui ont été évalués avec leurs épaisseurs à l'exception des premiers échantillons testés dans les dix essais préliminaires. Pour des raisons de confidentialité, la nature chimique des revêtements n'a pas été fournie par les manufacturiers. Les épaisseurs ont été mesurées à l'aide de l'appareil DeFelsko PosiTector 6000 à sept endroits différents sur la partie recouverte de la lame d'essai. Les graphiques du nombre d'impacts avant l'apparition de dommages visibles en

relation avec l'épaisseur mesurée sont présentés à la section 5.6 pour chaque type de revêtement et pour chaque essai où l'incertitude sur la valeur correspond à l'écart-type des données mesurées. Le **Tableau 10** présente les caractéristiques de trois revêtements industriels évalués.

Tableau 9: Identification et épaisseur des quatre revêtements de résistance à l'érosion connue

Type de revêtement	Fournisseurs	Épaisseur moyenne (µm)
Revêtement destiné au rotor d'hélice d'avion	Appliqué par Air Craft Paint	50 ± 0
Peinture de fuselage d'avion	Appliqué par Air Craft Paint	55 ± 1^1
Lotus Dry 123	Appliqué par Bioinnox	95 ± 1
Époxyde à base d'eau EC-3100	Appliqué par LIMA	124 ± 9

Tableau 10: Identification et épaisseur des trois revêtements industriels

Type de revêtement	Fournisseur	Épaisseur moyenne (µm)
Hydrophobic 1	Confidentiel	14 ± 1
Hydrophobic 2	Confidentiel	3 ± 2
Anti-Erosion 1	Confidentiel	11 ± 1

3.4.6 Sensibilité du montage

La sensibilité du montage et la reproductibilité des résultats ont été déterminées en évaluant quatre revêtements de résistance à l'érosion satisfaisant la norme aéronautique en utilisant le protocole d'essai présenté à l'annexe 1. Les quatre revêtements évalués ont été choisis selon leur niveau de résistance à l'érosion, allant du plus résistant au moins résistant, de façon à pouvoir déterminer si le montage est capable

¹ Mesure déterminée avec le profilomètre **Figure 39**

de différencier les types de revêtements habituellement rencontrés. Sur la base des résultats de ces essais, il a été possible de montrer que :

1. Le montage développé pour évaluer les revêtements utilisés dans le domaine aérospatial était assez sensible pour caractériser leur niveau de résistance à l'érosion.
2. Un revêtement glaciophobe pour satisfaire la norme aéronautique doit résister au minimum à 96 600 impacts.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4 RÉSULTATS

4.1 Introduction

Ce chapitre portant sur les résultats comprend la description de la fiche d'essai, la présentation des résultats des 19 essais de validation sur les quatre revêtements de résistance à l'érosion connue ainsi que les 18 essais sur les trois revêtements industriels.

4.2 Fiche d'essai

La fiche d'essai comprend sept parties dont un exemple est présenté aux quatre pages suivantes. La première partie, à la page 67, fait référence à la date, au numéro de l'essai ainsi qu'au nom du fournisseur du revêtement. La seconde donne le nom du dossier de calibration, le numéro de la lame échantillon, le nombre d'impacts subis, les valeurs moyennes de la pression et de la température de l'eau, la durée de l'essai et, finalement, le nombre d'impacts avant l'apparition de dommages visibles. La troisième partie montre le canevas des sites d'impacts à gauche, où il y a le nombre d'impacts sélectionnés pour chaque site de la rangée et, à droite, les sites érodés sélectionnés par le programme Excel pour la préparation de la fiche des résultats. La quatrième au bas de la page est réservée aux commentaires ou remarques sur le déroulement de l'essai. Les deux pages suivantes montrent les photos prises à l'aide du microscope des sites d'impacts érodés et, à la fin, la macrophotographie du canevas qui est prise à l'aide de la caméra. La fiche d'essai se termine à la page 70 avec les épaisseurs (μm) du revêtement telles que mesurées aux sept endroits représentés sur le dessin.



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

Essai :

Fournisseur

PARAMÈTRES

Nom du dossier de calibration

de la poutre

Nombre d'impacts (départ)

Nombre d'impacts (fin)

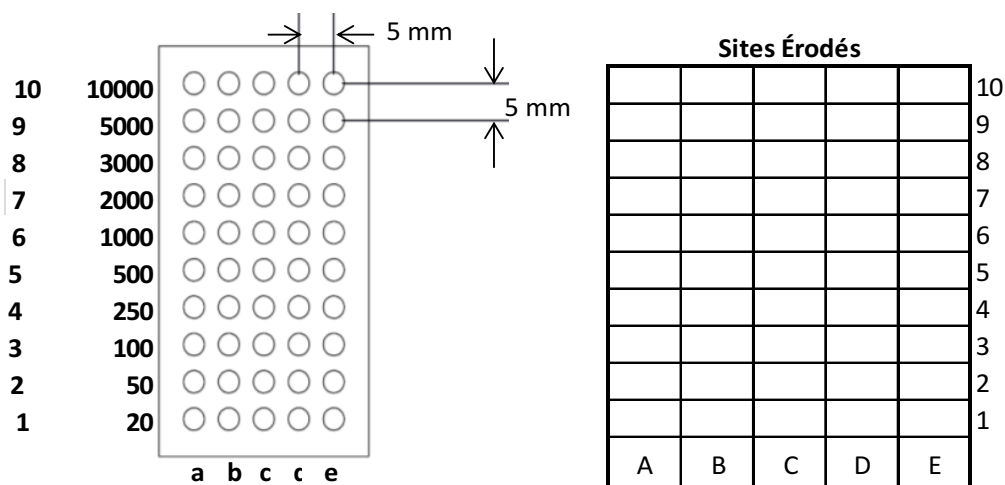
Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (psi)

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

GRILLAGES DES SITES D'IMPACTS



NOTE


















Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MICROPHOTOGRAPHIES DE RÉSISTANCE À L'ÉROSION

1A	1B	1C	1D	1E
2A	2B	2C	2D	2E
3A	3B	3C	3D	3E
4A	4B	4C	4D	4E
5A	5B	5C	5D	5E
6A	6B	6C	6D	6E
7A	7B	7C	7D	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A 	8B 	8C 	8D 	8E 
9A 	9B 	9C 	9D 	9E 
10A 	10B 	10C 	10D 	10E 

MACROPHOTOGRAPHIE

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

E

D

C

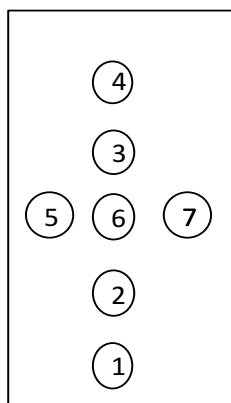
B

A



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ÉPAISSEURS MESURÉES



1	_____ μm
2	_____ μm
3	_____ μm
4	_____ μm
5	_____ μm
6	_____ μm
7	_____ μm

4.3 Présentation des résultats

Le **Tableau 11** présente les 19 essais de validation effectués sur les quatre revêtements de résistance à l'érosion connue tandis que le **Tableau 12** présente ceux des 18 essais réalisés avec les trois revêtements industriels. Ces tableaux identifient le type de revêtement évalué, le nombre d'impacts avant l'apparition de dommages visibles correspondant à un minimum de quatre sites érodés sur cinq pour une rangée, avec diverses remarques et commentaires appropriés. L'incertitude de la moyenne correspond à l'écart-type de l'ensemble des valeurs obtenues et celle entre parenthèse correspond à l'incertitude relative. Les 37 fiches d'essai peuvent être consultées à l'**annexe 2**. Les résultats seront l'objet de la discussion dans le prochain chapitre.

Tableau 11: Résultats obtenue pour les 4 revêtements de résistance à l'érosion satisfaisant la norme aéronautique

No	Type de revêtement	Nombre d'impacts avant l'apparition de dommages visibles	Remarques
2	Peinture de fuselage d'avion	X	Montage défectueux
3	Peinture de fuselage d'avion	X	Seulement un point érodé à 100 000
4	Peinture de fuselage d'avion	100 000	
5	Peinture de fuselage d'avion	100 000	
6	Peinture de fuselage d'avion	90 000	
Moyenne : 96 600 ± 5800 impacts (± 6 %)			
7	Revêtement destiné au rotor d'hélice d'avion	40 000	Devrait être le revêtement le plus résistant
13	Revêtement destiné au rotor d'hélice d'avion	50 000	

Moyenne : 45 000 ± 7000 impacts (± 16 %)			
8	Époxyde à base d'eau EC-3100 (lot 1)	50	Première application par un technicien du LIMA du revêtement sur les lames
9	Époxyde à base d'eau EC-3100 (lot 1)	500	
10	Époxy à base d'eau EC-3100 (lot 1)	250	
Moyenne : 270 ± 230 impacts (± 85 %)			
14	Époxyde à base d'eau EC-3100 (lot 2)	250	Deuxième application par un technicien du LIMA du revêtement sur les lames
15	Époxyde à base d'eau EC-3100 (lot 2)	250	
16	Époxyde à base d'eau EC-3100 (lot 2)	100	
17	Époxyde à base d'eau EC-3100 (lot 2)	250	
18	Époxyde à base d'eau EC-3100 (lot 2)	100	
19	Époxyde à base d'eau EC-3100 (lot 2)	100	
Moyenne : 175 ± 80 impacts (± 46 %)			
1	Lotus Dry 123	250	Premier essai non inclus dans les résultats ²
11	Lotus Dry 123	1000	Revêtement se détache morceaux de la surface
12	Lotus Dry 123	1000	
Moyenne : 1000 ± 0 impacts (± 0 %)			

² L'essai n'est pas inclus dans les résultats, car c'était un essai préliminaire qui a permis d'effectuer des ajustements sur le montage.

Tableau 12 : Résultats obtenus avec les 3 revêtements industriels

No	Type de revêtement	Nombre d'impacts avant l'apparition de dommages visibles	Remarques
20	Hydrophobic 1	2000	
21	Hydrophobic 1	2000	
22	Hydrophobic 1	2000	
23	Hydrophobic 1	2000	
24	Hydrophobic 1	2000	
25	Hydrophobic 1	3000	
Moyenne : 2200 ± 400 impacts (± 18 %)			
26	Hydrophobic 2	5000	
27	Hydrophobic 2	5000	
28	Hydrophobic 2	5000	
29	Hydrophobic 2	5000	
30	Hydrophobic 2	5000	
31	Hydrophobic 2	5000	
Moyenne : 5000 ± 0 impacts (± 0 %)			
32	Anti-Erosion 1	X	Aucune érosion présente à 10 000 impacts ³
33	Anti-Erosion 1	40 000	
34	Anti-Erosion 1	30 000	
35	Anti-Erosion 1	20 000	
36	Anti-Erosion 1	20 000	
37	Anti-Erosion 1	20 000	
Moyenne : 26 000 ± 8900 impacts (± 34 %)			

³ Après avoir fait subir au revêtement un nombre de 20 à 10 000 impacts, aucune érosion n'a été remarquée mais il a été convenu de ne pas poursuivre l'essai à des impacts plus élevé. Pour les échantillons du même revêtement, un nombre entre 20 000 et 50 000 impacts a été réalisé.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5 DISCUSSION

5.1 Introduction

Ce chapitre discute d'abord des résultats du nombre d'impacts obtenus avant l'apparition de dommages visibles, en les comparant entre eux et ensuite à ceux disponibles dans la littérature. Suit l'analyse du profil d'une peinture d'avion capable de supporter $96\,600 \pm 5\,800$ impacts satisfaisant la norme aéronautique. Le chapitre se termine par une brève discussion des effets de trois facteurs : la température, la pression d'eau et l'épaisseur du revêtement.

5.2 Nombre d'impacts avant l'apparition de dommages visibles

Dans la norme AMS-C-83231A [16], la résistance à l'érosion est déterminée comme étant le temps moyen de tenue lorsque les échantillons ont été érodés jusqu'au substrat. Avec le nouveau montage mis au point, la résistance est plutôt déterminée non pas à partir du temps de tenue, mais du nombre d'impacts d'une goutte de 2 mm jusqu'à l'apparition des premières traces d'érosion. Tous les résultats obtenus avec le nouveau montage ont été résumés au **Tableau 11** et au **Tableau 12**. Les niveaux de répétabilité calculés à partir des écarts-types pour les sept revêtements varient entre $\pm 0\%$ et $\pm 85\%$, donnant une moyenne de $\pm 26\%$. L'écart-type de $\pm 85\%$ ayant été obtenu avec des échantillons d'époxydes vieux de plus d'un an, il est donc probable que cette valeur anormalement élevée soit causée par le vieillissement des revêtements. Pour rejeter les résultats des revêtements vieillis de plus d'un an, on peut leur appliquer le test statistique de Dixon en calculant le facteur α déterminant le seuil de risque en utilisant la relation suivante. [34]

$$\alpha = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} \quad (5)$$

où

x_n correspond à la donnée supposément aberrante ($\pm 85\%$)

x_{n-1} correspond à la donnée juste inférieure à la donnée aberrante ($\pm 46\%$)

x_l correspond à la plus petite donnée ($\pm 0 \%$)

$$\alpha = \frac{85 - 46}{85 - 0}$$

$$\alpha = 0,471$$

Appliqué aux huit (8) valeurs moyennes d'écart-type en main, le seuil de risque calculé est de 0,471. D'après la table de la loi de Dixon présentée au **Tableau 13**, pour les huit valeurs moyennes d'écart-type concernées, le seuil de risque α à 0,05 soit 95 % est de 0,468 [34].

Tableau 13 : Valeur critique pour un seuil de risque α de 0,01 et 0,05

n	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,05$
3	0,988	0,941
4	0,889	0,765
5	0,780	0,642
6	0,698	0,560
7	0,637	0,507
8	0,590	0,468
9	0,555	0,437
10	0,527	0,412

Comme la valeur de 0,468 au **Tableau 13** est plus petite que celle de 0,471 calculée à l'aide de l'équation 5, nous sommes donc en mesure de rejeter l'écart type de $\pm 85\%$. Cette donnée est donc considérée comme étant aberrante à 95% [34]. Donc en la retirant, l'intervalle de variation des écarts-types est réduite entre $\pm 0\%$ et $\pm 47\%$ pour une moyenne de $\pm 17\%$ sur les sept revêtements.

Pour les sept différents revêtements, le nombre moyen d'impacts varie entre 175 et 96 600. L'essai développé est suffisamment sensible pour classer la résistance à l'érosion de différents revêtements de façon adéquate. L'histogramme de la **Figure 38** montre le nombre moyen d'impacts, avec les écarts-type, produisant l'érosion de chaque

revêtement. Par exemple, la peinture d'avion ayant une moyenne de $96\,600 \pm 5800$ impacts ($\pm 6\%$) donne un résultat significativement distinct de celui obtenu avec le recouvrement du rotor d'avion, dont la moyenne est de $45\,000 \pm 7000$ impacts ($\pm 16\%$).

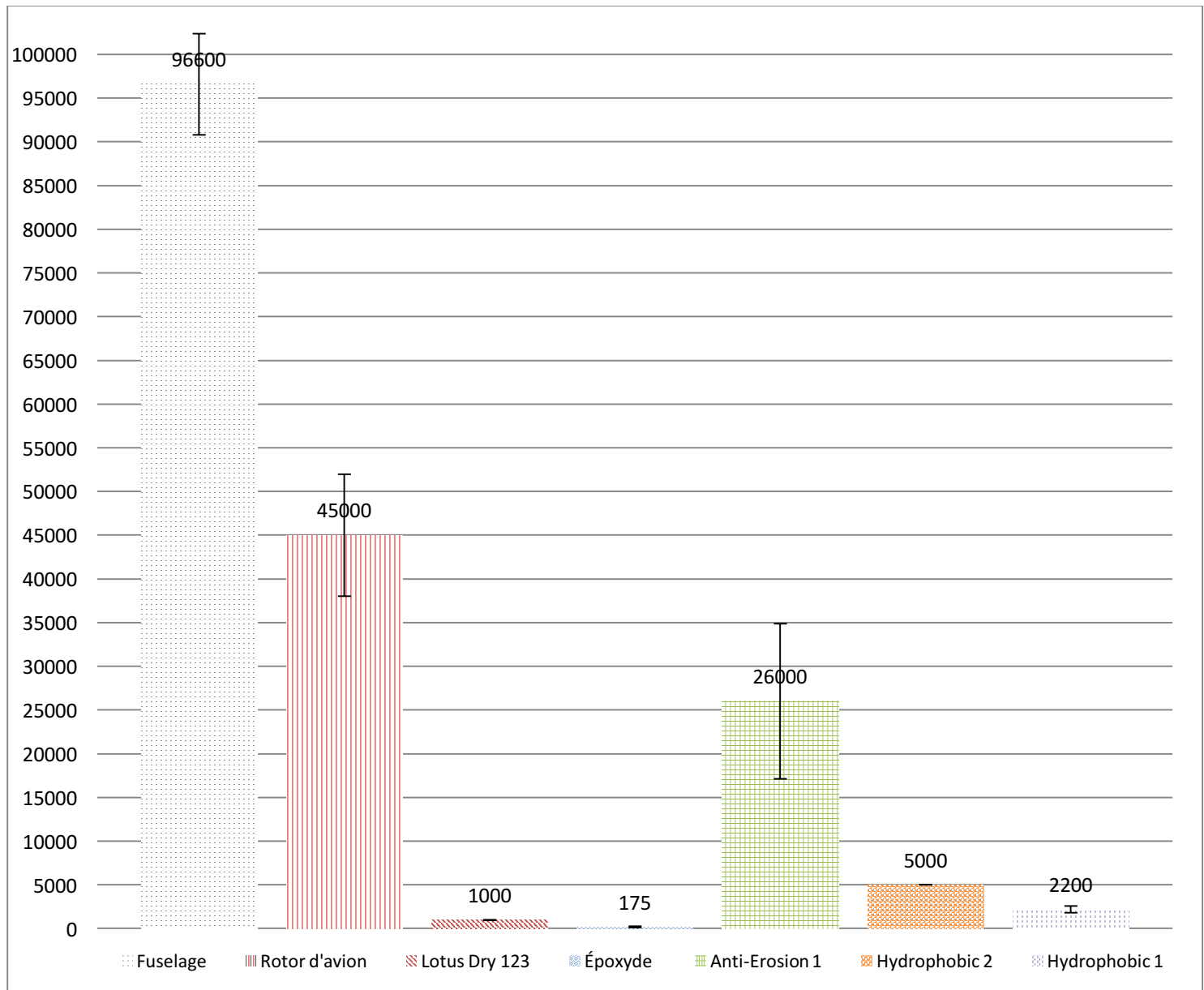


Figure 38: Histogramme du nombre moyen d'impacts avec écart-type produisant l'érosion des 7 revêtements différents

Les différences entre les résultats obtenus permettent de classer les sept (7) revêtements en allant du plus résistant (1) au moins résistant (4) :

Pour les revêtements satisfaisant la norme aéronautique :

1. Peinture de fuselage d'avion ($96\,600 \pm 5800$ impacts)
2. Revêtement destiné au rotor des hélices d'avion ($45\,000 \pm 7000$ impacts)
3. Lotus Dry 123 (1000 ± 80 impacts)
4. Époxyde à base d'eau (175 ± 80 impacts)

Pour les revêtements industriels :

1. Anti-Erosion 1 ($26\,000 \pm 8900$ impacts)
2. Hydrophobic 2 (5000 ± 0 impacts)
3. Hydrophobic 1 (2200 ± 400 impacts)

On constate que la peinture de fuselage d'avion est plus résistante que le revêtement destiné au rotor des hélices d'avion. Toutefois ce résultat est plutôt inattendu. En effet, il devrait être plus résistant. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que le revêtement destiné au rotor des avions n'a pas été appliqué sur un substrat convenant à ce type de revêtement. C'est pourquoi les échantillons d'alliage aluminium 6061-T6 ne seraient pas représentatifs du matériel d'un rotor d'hélices d'avion.

Un manque d'adhérence sur l'aluminium a aussi été observé avec le Lotus Dry, ce dernier éclatant en morceaux en laissant la surface à découvert. Le Lotus Dry a été initialement développé pour application sur les pales d'éoliennes fabriquées en fibre de verre. L'adhérence du revêtement au substrat semble donc avoir une très grande importance sur les résultats obtenus. C'est pourquoi, à l'avenir, il serait conseillé d'évaluer un revêtement appliqué sur le bon substrat.

5.3 Comparaison avec les résultats disponibles

Premièrement, il est difficile de comparer les résultats obtenus avec ceux disponibles dans la littérature puisque la composition chimique des revêtements n'est pas connue au départ. En effet, l'ensemble des résultats cités dans la littérature fait référence

à la composition chimique, c'est pourquoi il nous est difficile d'en faire la comparaison. De plus, dans plusieurs projets de recherche, la rugosité moyenne R_a ainsi que la hauteur maximum des pics de rugosité ont été mesurées en même temps que la résistance à l'érosion lors de la comparaison des résultats entre les différents types de montage à bras tournant et à jet d'eau. Avec notre nouveau montage à jet d'eau, l'évaluation de l'érosion du revêtement s'est limitée seulement à l'analyse microscopique des sites érodés seulement.

Deuxièmement, selon la relation d'équivalence dans la norme aéronautique, on devrait s'attendre à ce que le nombre d'impacts de $96\,600 \pm 5800$ obtenus avec le nouveau montage pour la peinture d'avion répondant à la norme aéronautique soit équivalent à un temps de tenue variant de 100 à 180 minutes mesuré avec un montage à bras tournant certifié. Or, il n'existe à notre connaissance aucune étude faisant référence aux nombres d'impacts subis par ce revêtement évalué avec un montage à jet d'eau certifié. On ne dispose seulement que de quelques revêtements évalués avec le montage à bras tournant par lequel les résultats obtenus se situeraient toutefois dans le bon ordre de grandeur. On peut comprendre qu'il reste difficile d'établir une relation d'équivalence, compte tenu du petit nombre d'essais complétés.

Troisièmement, en comparant les résultats obtenus pour les revêtements évalués avec notre montage avec ceux connus avec le montage à jet d'eau certifié PJET (section 2.2.1), il est possible de constater que le nombre d'impacts mesurés y est plus élevé. En effet, les valeurs publiées se situent sous les 5000 impacts, comparativement au nombre de 100 000 obtenus au laboratoire. Presque tous les revêtements évalués au laboratoire ont supporté au-dessus de 5000 impacts, à l'exception de l'époxyde à base d'eau, du Lotus Dry 123 et de l'Hydrophobic 1. Toutefois, il est difficile de les comparer. En effet, même si les montages à jet d'eau opèrent dans des conditions similaires, les compositions chimiques des revêtements évalués sont inconnues et il n'est pas indiqué s'ils répondent à la norme aéronautique. Il conviendrait donc de procéder à des essais inter-laboratoire afin de pouvoir comparer les résultats et ainsi établir la différence entre le PJET et notre montage.

Finalement, même s'il est impossible de comparer et valider le montage, l'objectif de départ visant à effectuer une méthode comparative est atteint.

5.4 Profilométrie

La peinture d'avion répondant à la norme aéronautique [16] appliquée sur la lame d'aluminium a été examinée à l'aide du profilomètre microXAM-100 HR 3D après avoir été soumise à 100 000 impacts. Le profil obtenu, illustrée à la **Figure 39**, montre un cratère d'environ 55 μm de profondeur au fond duquel il est possible de distinguer le substrat métallique en bleu.

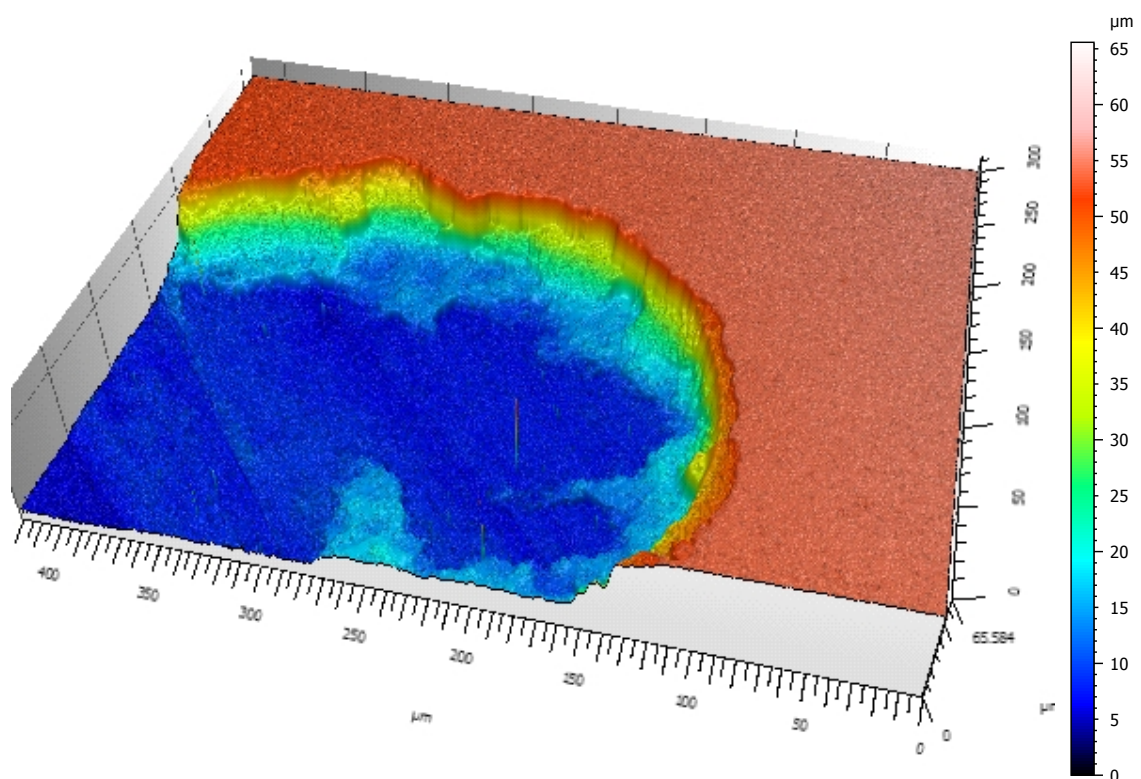


Figure 39: Profilométrie de la peinture pour le fuselage des avions.

Dans un article publié par la *Technical Gazette* [35], l'érosion par jet d'eau jusqu'au métal d'un revêtement appliqué sur l'acier inoxydable est obtenue au terme de 106 000 impacts. L'essai a été effectué à une pression d'eau de 30 MPa, produisant une vitesse de jet de 222 m/s et une distance entre la buse et l'échantillon de 50 mm. Ces conditions diffèrent de celles recommandées pour la certification aéronautique. Les photos de la **Figure 40** montrent l'érosion progressive subie par le revêtement, à mesure

qu'augmente le nombre d'impacts allant de 2 125 à 106 250. On peut y voir qu'après 42 500 impacts, 10 % de la surface du substrat métallique est érodée, pour atteindre 40 % à 106 250 impacts (voir encadrés).

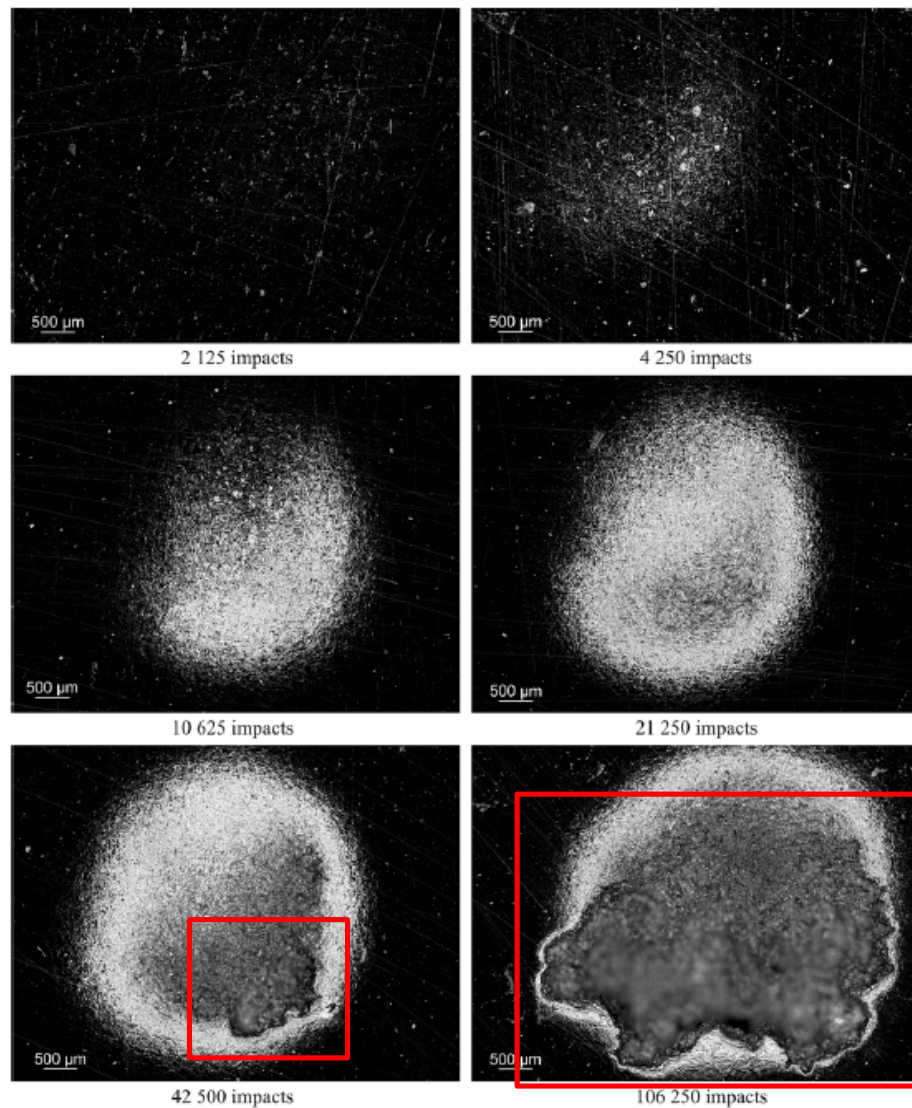


Figure 40: Érosion progressive d'un revêtement jusqu'au substrat métallique pour 2 125 à 106 250 impacts [35]

Les conditions d'essais de notre nouveau montage qui sont celles recommandées pour la certification aéronautique, soit la pression d'eau de 14 MPa produisant un jet de 180 m/s et une distance entre la buse et l'échantillon de 60 mm diffèrent de celles présentées dans l'article suivant [35]. Nos seuls essais où le jet a érodé le métal sont ceux du revêtement destiné au rotor d'avion qui a nécessité 70 000 impacts. La **Figure 41**

présente des traces d'érosion découvrant l'aluminium (encadrés rouges) sur trois des cinq sites à 60 000 impacts et sur l'ensemble des cinq sites à 70 000 impacts et plus. La taille des cavités augmente avec le nombre d'impacts, couvrant presque la totalité de la surface exposée à 100 000 impacts.

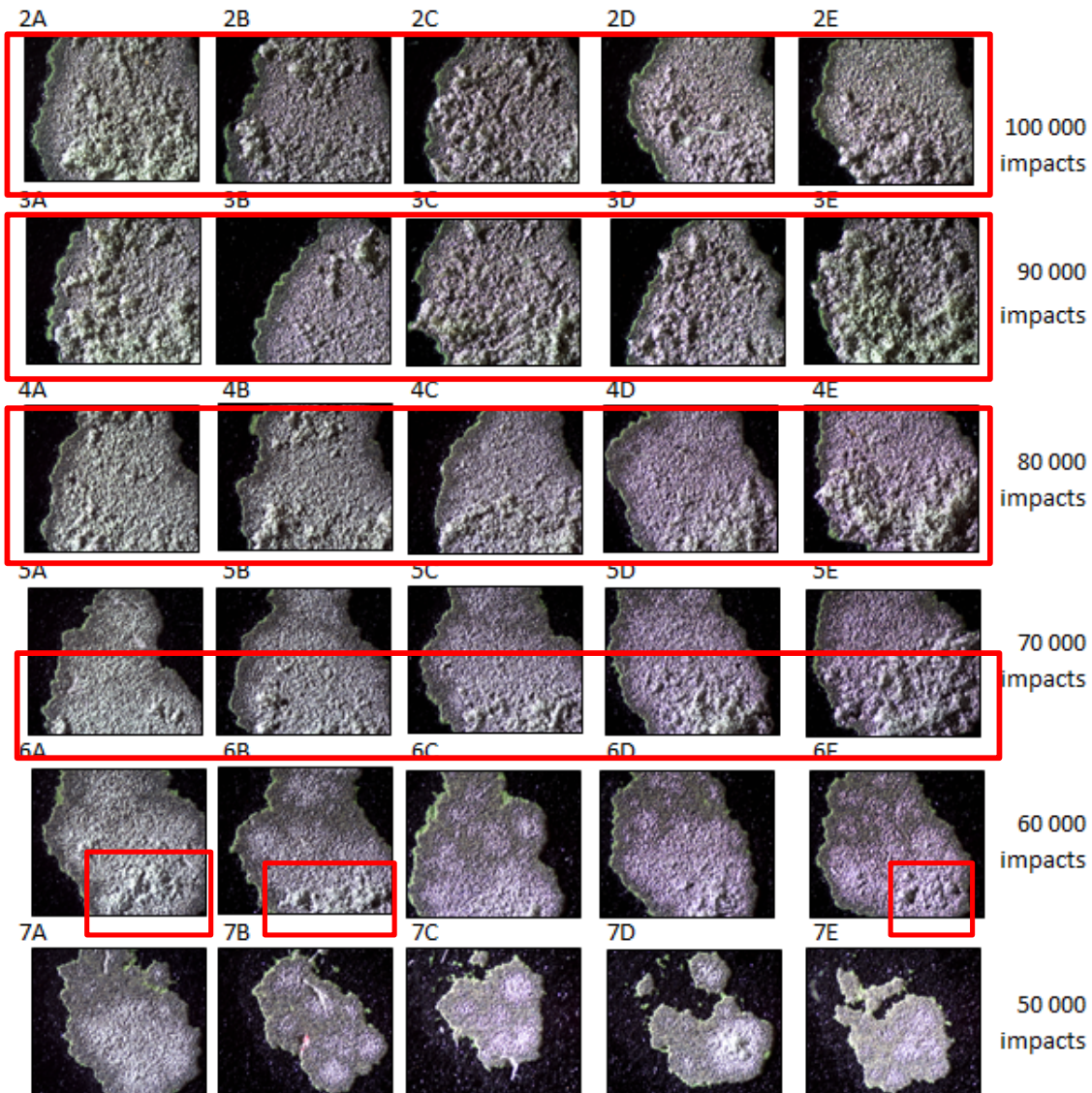


Figure 41: Érosion jusqu'à l'aluminium du revêtement destiné au rotor d'avion

Les résultats obtenus au laboratoire pour ce qui est de l'érosion du substrat sont compris entre 60 000 et 70 000 impacts. Ils sont du même ordre de grandeur que les valeurs obtenus de 42 500 à 106 000 impacts dans l'article de la Gazette [35]. Par contre,

ne connaissant pas la composition chimique des revêtements et les deux substrats n'étant pas les mêmes, il reste difficile de comparer nos résultats à ceux publiés dans l'article.

5.5 Stabilité de la pression et température de l'eau

Les histogrammes de la pression et de la température de l'eau ont déjà été présentés aux **Figure 35** et **36**. Pour ce qui est de la pression de l'eau, elle est stable d'un essai à l'autre, étant à l'intérieur de l'erreur de mesure qui est de ± 865 kPa. En effet, pour les 36 essais elle varie entre $15\,596$ et $15\,844 \pm 865$ kPa pour une moyenne de $15\,754 \pm 865$ kPa. Par ailleurs, pour ce qui est de la température de l'eau, elle varie entre 3 à 16 ± 4 °C avec une moyenne de 13 ± 4 °C. Sur l'histogramme de la **Figure 42**, il est possible de distinguer la saison où chaque essai a été réalisé, la température en été y étant plus élevée qu'en hiver.

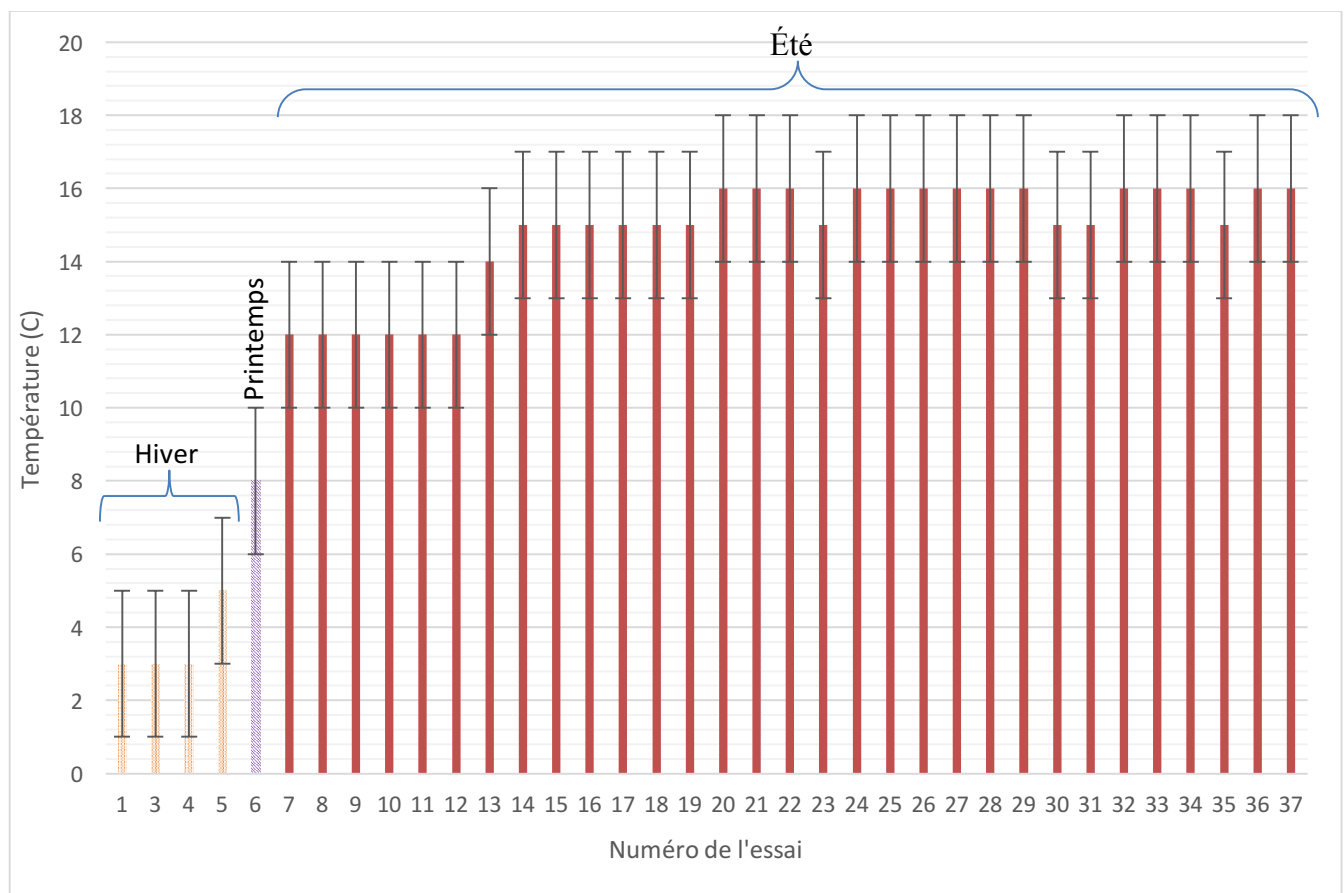


Figure 42 : Histogramme de la température de l'eau relatif aux 37 essais

Pour les essais 1, 3, 4 et 5 en hiver, la température varie entre 3 et 5 °C, pour l'essai 6 au printemps la température est de 8 °C et pour les essais 7 à 37 en été, les températures varient de 12 à 16 °C. En raison du peu d'essais effectués en saison hivernale, il est impossible pour le moment d'analyser l'effet de la température de l'eau sur l'érosion des revêtements. Toutefois, ce paramètre nous apparaît comme un facteur beaucoup moins important, la température n'étant pas mentionnée dans la norme aéronautique, comparativement à la pression de l'eau qui est le facteur déterminant de la vitesse du jet.

5.6 Épaisseur du revêtement

Les **Figures 43 à 48** suivantes présentent les histogrammes du nombre d'impacts et des épaisseurs des sept revêtements, ces dernières variant entre 3 et 124 μm . Sur la base de ces données, l'épaisseur ne semble pas influencer le taux d'érosion.

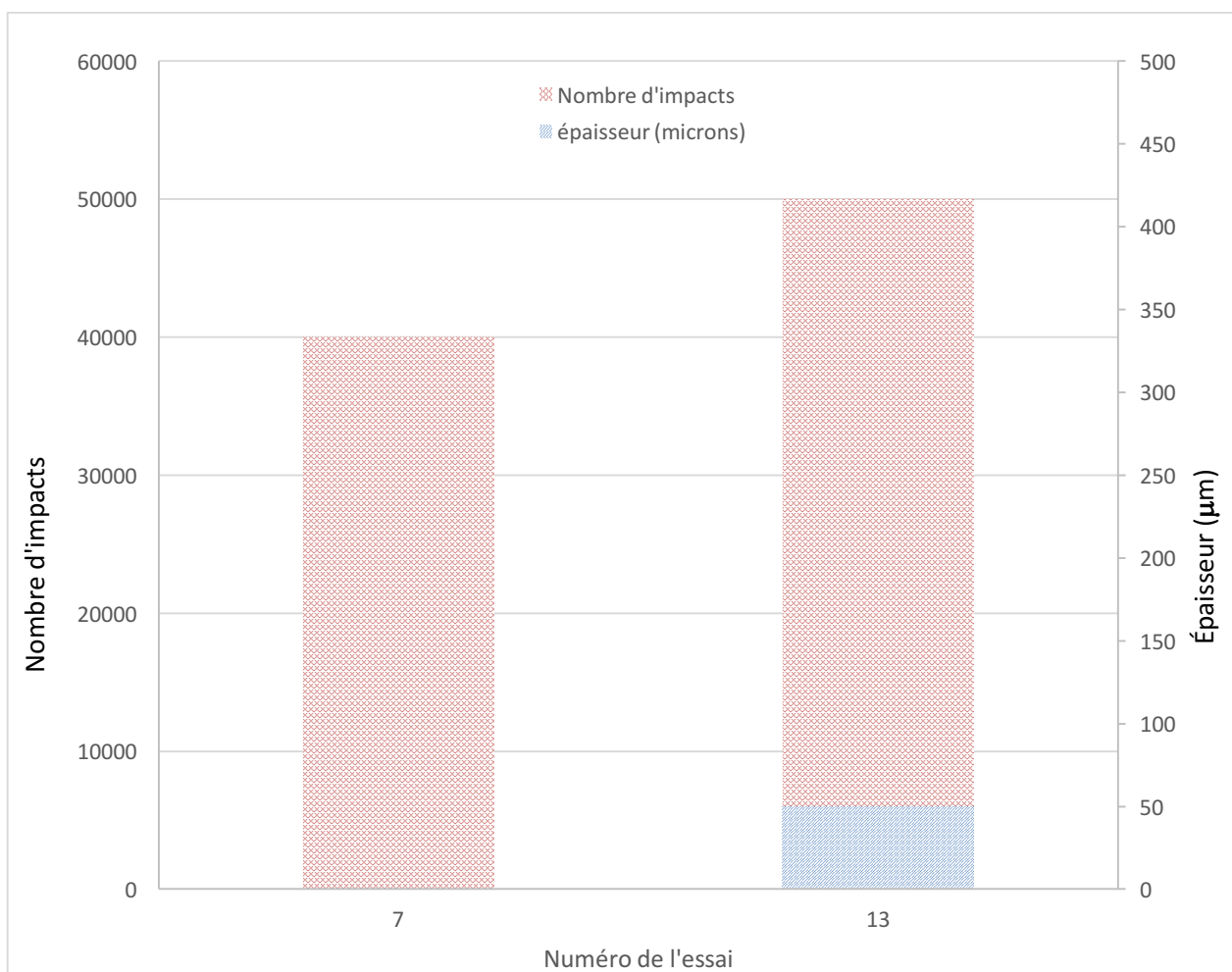


Figure 43 : Histogramme de l'épaisseur moyenne pour le revêtement déposé sur un rotor d'hélice avant l'apparition de dommage pour les 2 essais

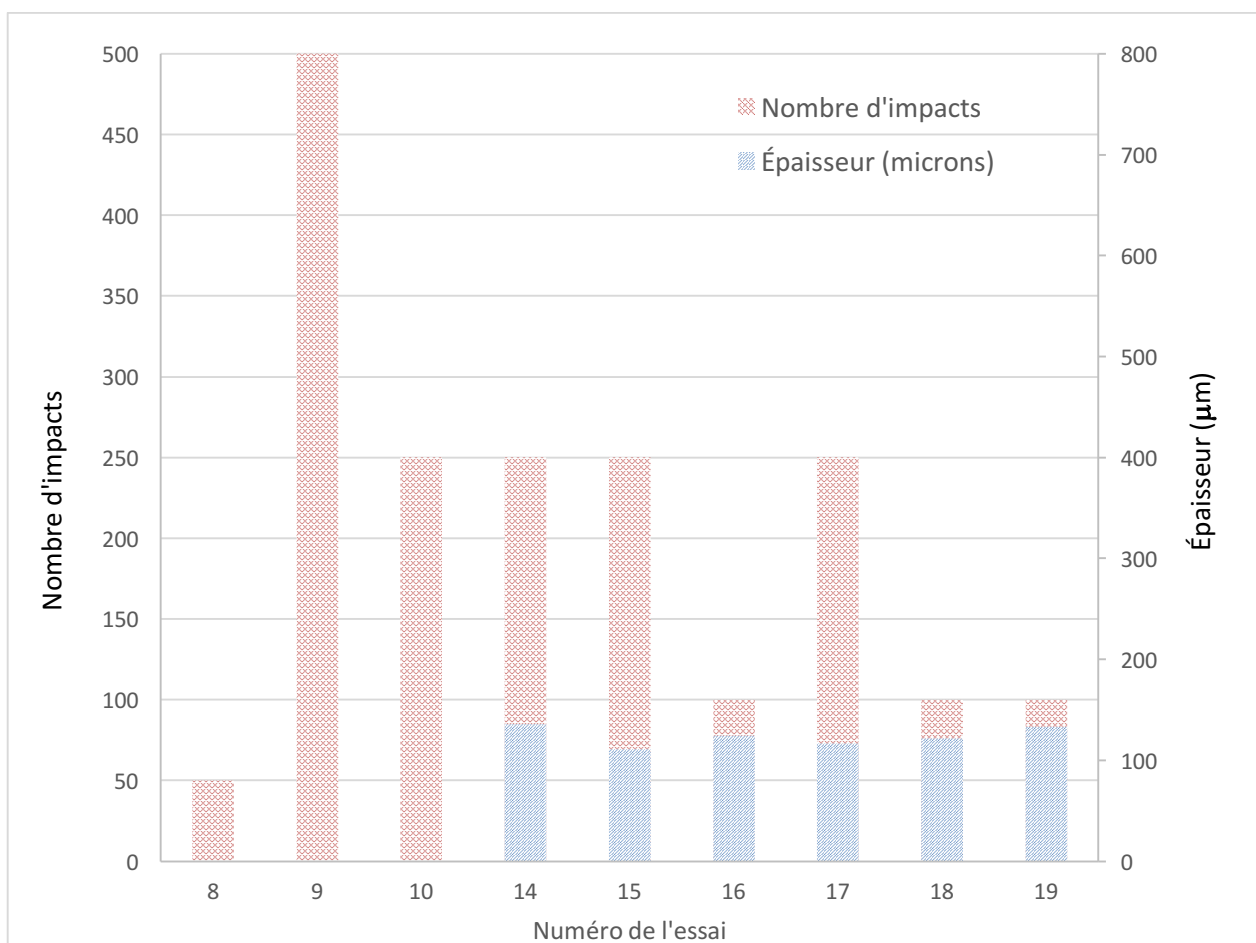


Figure 44: Histogramme du nombre d'impacts et de l'épaisseur du revêtement d'époxyde avant l'apparition de dommage pour les 6 essais

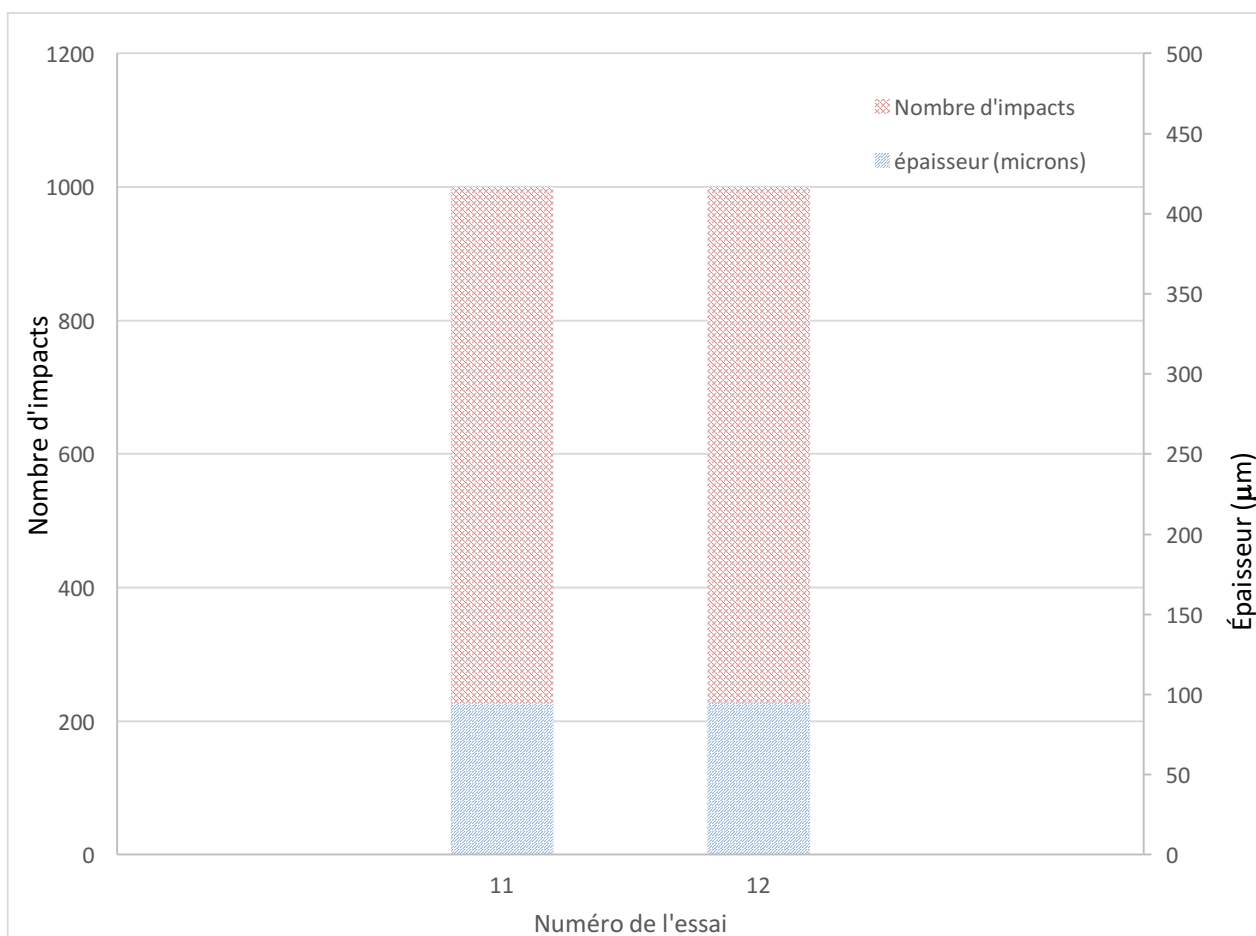


Figure 45: Histogramme de l'épaisseur moyenne pour le revêtement Lotus Dry avant l'apparition de dommage pour les 2 essais

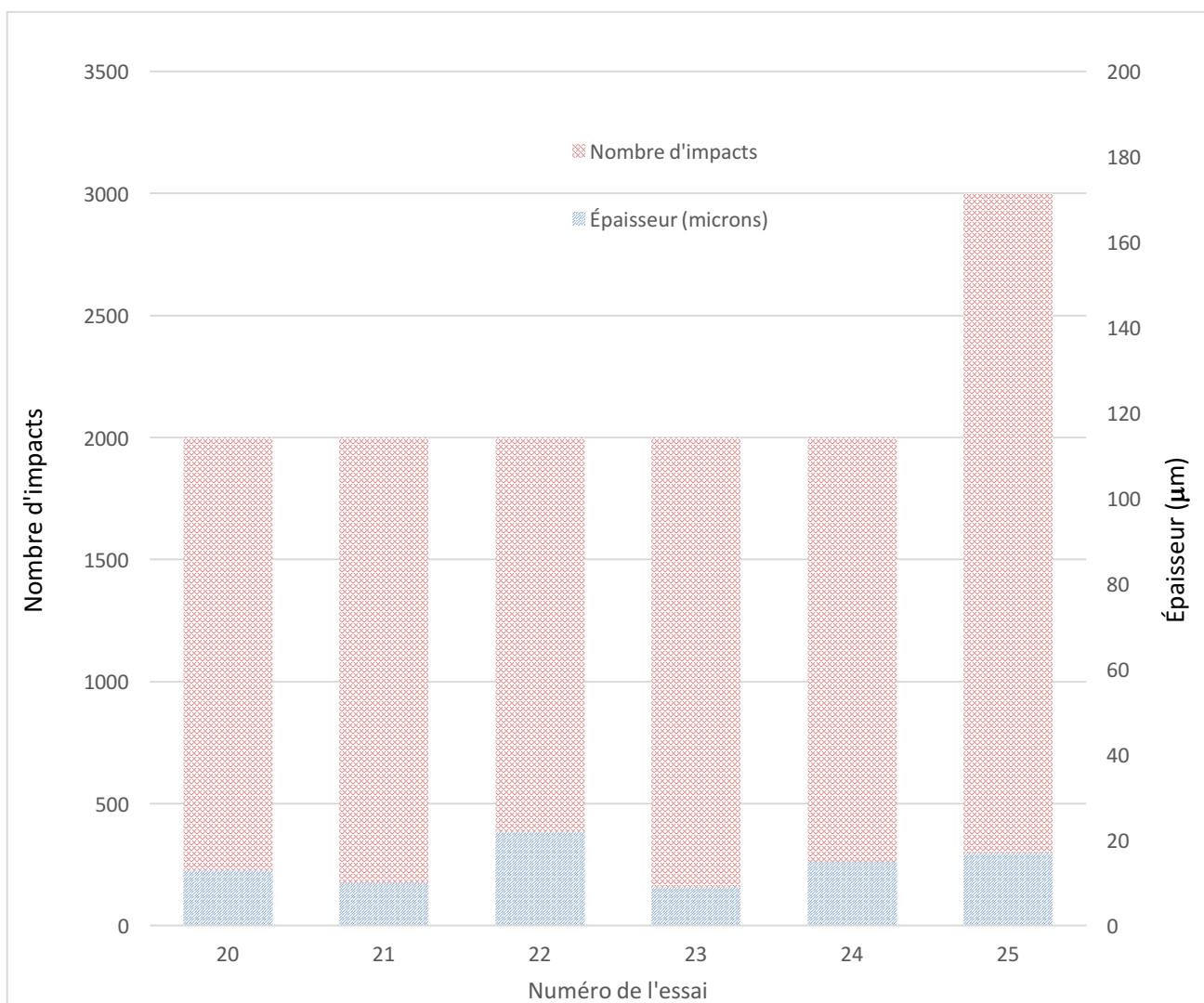


Figure 46: Histogramme de l'épaisseur moyenne pour le revêtement Hydrophobic 1 avant l'apparition de dommage pour les 6 essais

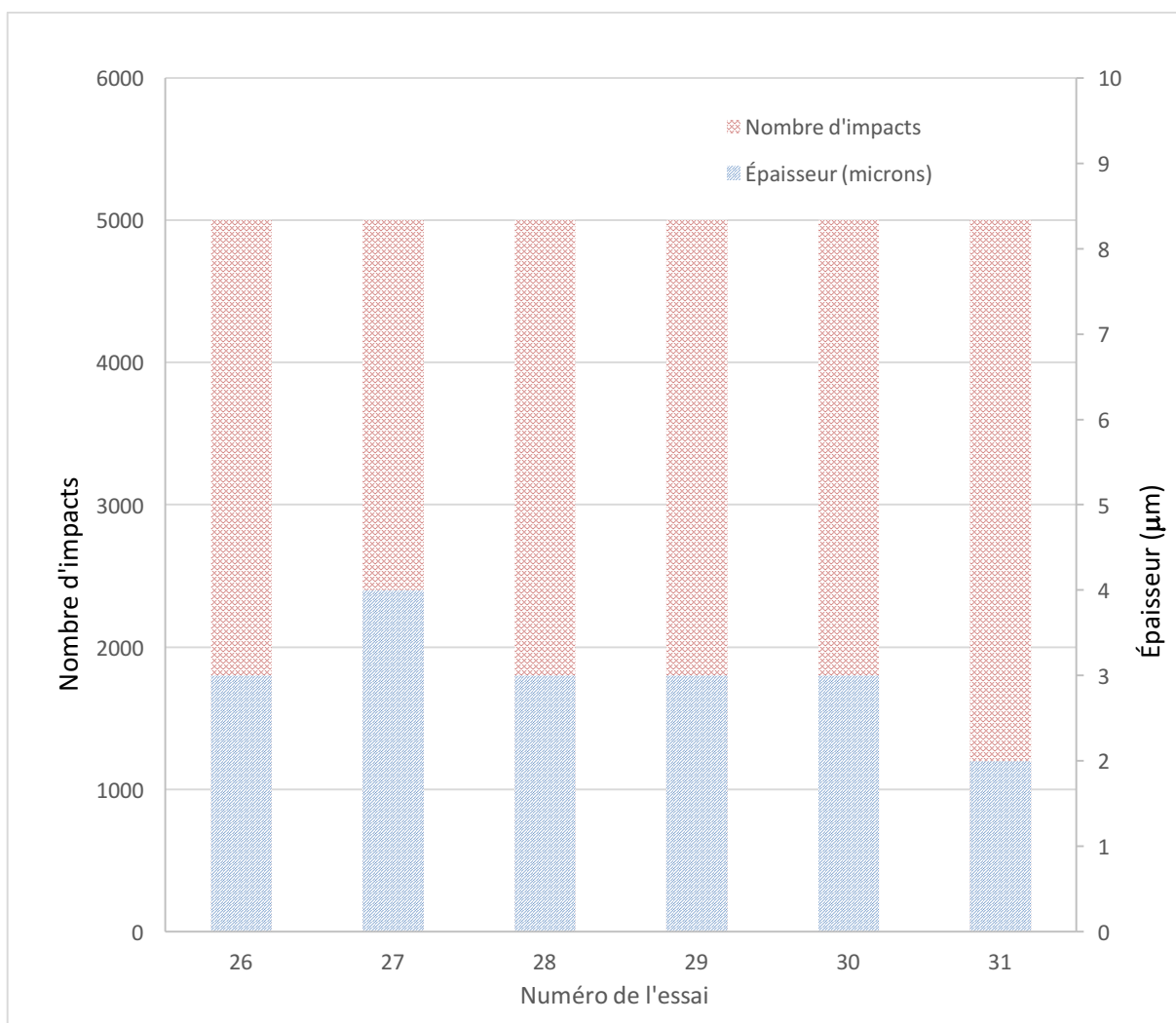


Figure 47: Histogramme de l'épaisseur moyenne pour le revêtement Hydrophobic 2 avant l'apparition de dommage pour les 6 essais

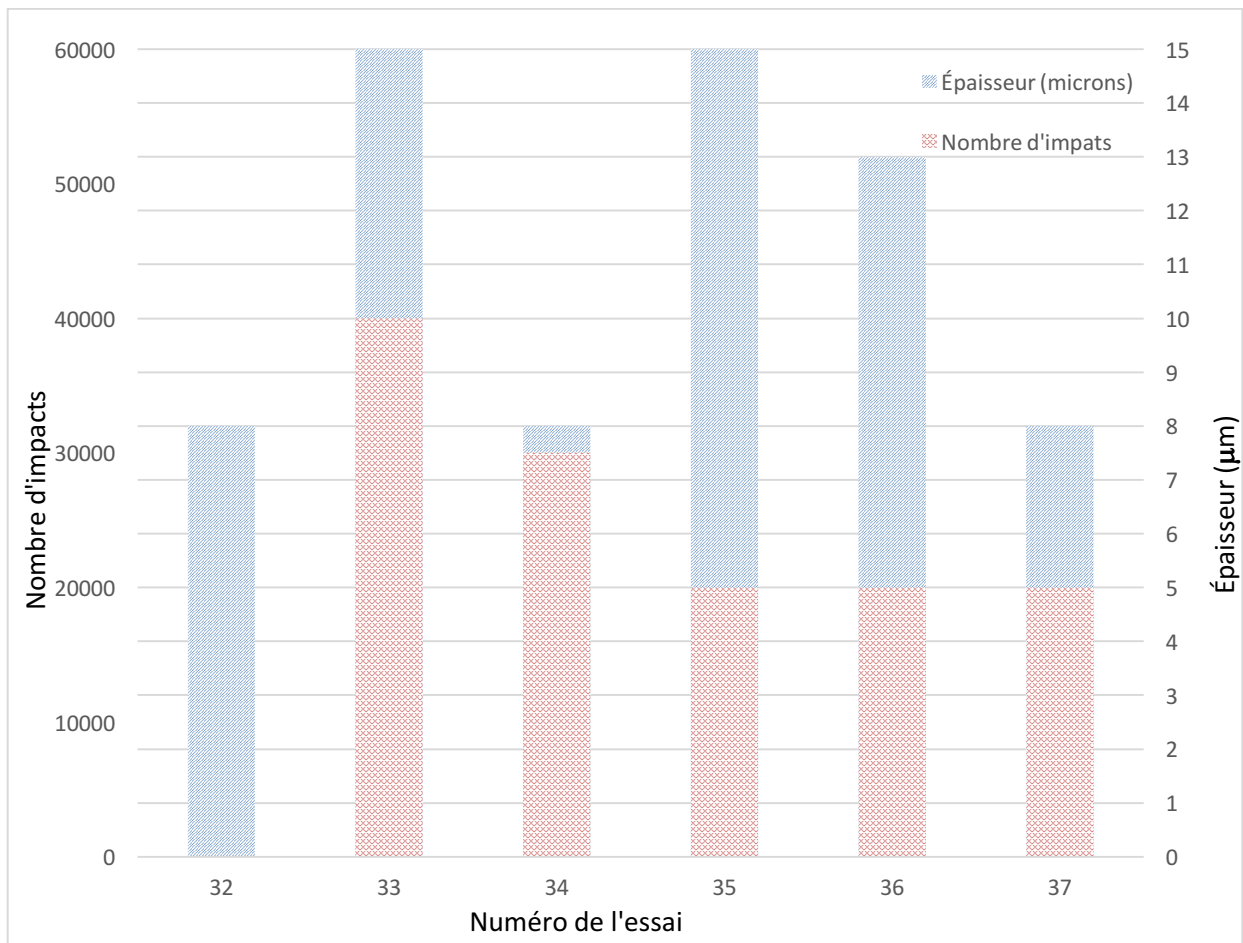


Figure 48: Histogramme de l'épaisseur moyenne pour le revêtement Anti-Erosion 1 avant l'apparition de dommage pour les 6 essais

En effet, la **Figure 44** montre que peu importe la valeur d'épaisseur variant de 111 à 136 μm du revêtement d'époxyde, le nombre moyen d'impacts mesurant le taux d'érosion est de 175 ± 80 impacts. La différence de 25 μm entre les épaisseurs mesurées est cependant trop faible pour tirer une conclusion solide. Des essais supplémentaires devront donc être effectués avec un revêtement de composition chimique connue, où il sera appliqué volontairement à différentes épaisseurs.

De plus, il a été observé que même à de faibles épaisseurs, le revêtement peut se montrer résistant à l'érosion. La **Figure 47** illustre ce propos avec le revêtement Hydrophobic 2, dont l'épaisseur variant de 2 à 4 μm supportant une moyenne de 5000 ± 0 impacts, soit beaucoup plus que l'époxyde. Encore une fois, il est difficile de tirer une

conclusion à la suite de cette observation. Des essais supplémentaires à l'aide d'un revêtement connu appliqué avec une faible épaisseur seront évalués.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions

L'objectif principal du projet de maîtrise était de développer un montage simple et pratique reproduisant les conditions de l'érosion par la pluie, pour caractériser de façon comparative la résistance à l'érosion de différents revêtements glaciophobes contraint d'utiliser les mêmes lames échantillons que pour l'essai d'adhérence de la glace. Un montage de type jet d'eau a été fabriqué, ce dernier occupant moins d'espace et étant plus sécuritaire que le montage à bras tournant; d'autre part, il répond aux deux (2) exigences de la norme aéronautique, soit une goutte de 2 mm et un taux de précipitation de 25,4 mm/h. Avec ce taux de précipitation, la vitesse du jet d'eau est de 180 m/s. Avec le montage à jet d'eau, la résistance à l'érosion est mesurée par le nombre d'impacts avant l'apparition de dommages visibles et non en fonction du temps de tenue à l'érosion, comme pour les montages à bras tournant. Les essais réalisés ont permis la validation des conditions d'opération, dont la pression et la température de l'eau ainsi que la robustesse du montage. Ces essais ont montré que l'appareil était fonctionnel dans toutes les conditions d'opérations; seule la température de l'eau a varié entre 4 et 20 °C suivant les saisons.

Le protocole expérimental d'essai et le logiciel de contrôle développé ont permis d'évaluer la résistance à l'érosion de façon reproductible de sept (7) revêtements, donnant des résultats stables et comparatifs avec des écarts-types variant de $\pm 0\%$ et $\pm 47\%$ pour une moyenne de $\pm 17\%$. Une fiche d'essai a été élaborée pour bien documenter tous les paramètres.

Même si le montage développé ne peut pas être utilisé pour réaliser la certification des revêtements, il s'est révélé suffisamment sensible pour permettre de classer les revêtements évalués à partir du nombre d'impacts avant l'érosion. Enfin, les essais avec les revêtements industriels confirment les résultats obtenus dans les essais de validation en obtenant un taux d'érosion différent pour chaque revêtement.

6.2 Recommandations

Afin de pouvoir certifier des revêtements avec le montage proposé, il est recommandé d'effectuer des essais d'érosion avec des revêtements certifiés satisfaisant à la norme aéronautique et d'autres revêtements non certifiés. Pour les revêtements non certifiés, il faudrait en connaître la composition chimique afin d'être en mesure de les comparer aux autres revêtements et en faire évaluer la résistance à l'érosion avec les deux types de montage par des laboratoires certifiés.

En raison du petit nombre d'essais effectués, il a été difficile de démontrer que l'épaisseur du revêtement avait une influence sur le taux d'érosion. Il est recommandé d'évaluer des revêtements de composition chimique connus de différentes épaisseurs. Par exemple, en utilisant un revêtement dont le taux d'érosion est connu et ayant une bonne adhérence au substrat, il serait intéressant de l'évaluer en couche d'épaisseurs variables.

Enfin, afin d'avoir suffisamment de données statistiques sur la reproductibilité des essais, il est recommandé avant de débiter chaque série d'essais d'évaluer un revêtement normalisé servant de standard. Ceci permettra de confirmer que le montage est fonctionnel.

BIBLIOGRAPHIE

1. Grenier, M., *Microstructure et résistance à l'usure de revêtements créés par fusion laser avec gaz réactifs sur du titane*. 1999: Université Laval.
2. Déom, A., R. Gouyon, and C. Berne, *Rain erosion resistance characterizations: Link between on-ground experiments and in-flight specifications*. *Wear*, 2005. **258**(1): p. 545-551.
3. Tobin, E., et al., *Comparison of liquid impingement results from whirling arm and water-jet rain erosion test facilities*. *Wear*, 2011. **271**(9): p. 2625-2631.
4. Liersch, J. and J. Michael, *Investigation of the impact of rain and particle erosion on rotor blade aerodynamics with an erosion test facility to enhancing the rotor blade performance and durability*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. IOP Publishing.
5. Gohardani, O., *Impact of erosion testing aspects on current and future flight conditions*. *Progress in Aerospace Sciences*, 2011. **47**(4): p. 280-303.
6. Stachowiak, G. and A.W. Batchelor, *Engineering tribology*. 2013: Butterworth-Heinemann.
7. Min KU, L., et al., *Liquid Impact Erosion Mechanism and Theoretical Impact Stress Analysis in TiN-Coated Steam Turbine Blade Materials*. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999. **30A**: p. 7.
8. Jansen, P., et al., *Handbuch Regen-Erosion: Erosion von Werkstoffen durch Tropfenschlag bei hohen Fluggeschwindigkeiten*. 1983: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung.
9. Jackson, M. and J. Field, *Modelling liquid impact fracture thresholds in brittle materials*. *British ceramic transactions*, 2000. **99**(1): p. 1-13.
10. American Society for Testing and Materials, *Standard Test Methode For Liquid Impignement Erosion Using Rotating Apparatus* 2010, ASTM International: West Conshohocken, PA (USA). p. 19.
11. Tobin, E. *Development of a Rain Erosion Test Facility*. [cited 2016 01-29]; Available from: <http://www2.ul.ie/pdf/305950313.pdf>.
12. Laforte, C., et al., *Icephobic Coating Evaluation for Aerospace Application*, in *55th AIAA/ASMe/ASCE/AHS/SC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 2014, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
13. Laforte, C., C. Blackburn, and J. Perron, *A Review of Icephobic Coating Performances over the Last Decade, 2015-01-2149*, in *Conference on Icing of Aircraft, Engines, and Structures*. 2015, SAE 2015 International: Prague, Czech Republic.
14. Blackburn, C., C. Laforte, and J.L. Laforte, *Identification of the best substrate and coating in view of a anti-icing potentiel using on helicopter blades*. 2009. p. 62.
15. Caroline, B. and L. Caroline, *Identification of the best coating in view of an anti-icing potential use on helicopter blades - Phase II*. 2014. p. 71.
16. AMS, *SAE AMS-C-83231A Coating, Polyuréthane, Rain Erosion Resistant for Exterior Aircraft and Missile Plastic Parts*. 2001. p. 16.
17. Dayton, U.o., *Rain Erosion Test Apparatus (Instruction Manual)*, Air Force Research Laboratory (AFRL) and Materials Degradation Test Facility (MDTF), Editors. 2006: WRIGHT-PATTERSON AIR FORCE BASE, OHIO. p. 40.

18. Westmark, C. and G.W. Lawless, *A discussion of rain erosion testing at the United States Air Force rain erosion test facility*. Wear, 1995. **186**: p. 384-387.
19. Tobin, E.F., T.M. Young, and D. Raps. *Evaluation and correlation of inter-laboratory results from a rain erosion test campaign*. in *28 th International congress of the aeronautical sciences*. 2012.
20. Lammel, P., et al., *Analysis of rain erosion resistance of electroplated nickel-tungsten alloy coatings*. Surface and Coatings Technology, 2012. **206**(8): p. 2545-2551.
21. Lammel, P., et al., *Droplet erosion performance of composite materials electroplated with a hard metal layer*. Wear, 2011. **271**(9): p. 1341-1348.
22. Whitehead, A.H., et al., *Rain erosion characteristics of electrodeposited Ni-SiC metal-matrix composite layers*. Wear, 2011. **270**(9): p. 695-702.
23. Obara, T., N. Bourne, and J. Field, *Liquid-jet impact on liquid and solid surfaces*. Wear, 1995. **186**: p. 388-394.
24. Field, J., *ELSI conference: invited lecture: liquid impact: theory, experiment, applications*. Wear, 1999. **233**: p. 1-12.
25. Hammitt, F.G., et al., *Laboratory scale devices for rain erosion simulation*. 1967.
26. P N H Davies and J.E. Field, *Window and Dome Technologies and Materials*. SPIE, 1989. **1112**: p. 316-327.
27. Jilbert, G. and J. Field, *Synergistic effects of rain and sand erosion*. Wear, 2000. **243**(1): p. 6-17.
28. Zeng, J. and T.J. Kim, *An erosion model for abrasive waterjet milling of polycrystalline ceramics*. Wear, 1996. **199**(2): p. 275-282.
29. Williams, J.A., *Engineering tribology*. 1994, Oxford, England: Oxford University Press. xix, 488 p.
30. Zambelli, G. and L. Vincent, *Matériaux et contacts : une approche tribologique*. 1re éd. ed. 1998, Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes. xiv, 337 p.
31. Takadoun, J., *Matériaux et surfaces en tribologie*. 2007, Paris: Hermes/Lavoisier. 204 p.
32. Bhushan, B., *Modern tribology handbook*. 2001, Boca Raton, FL: CRC Press. 2 volumes.
33. *Pipes and Fluid Flow Velocities* [cited 2016 02-11]; Available from: http://www.engineeringtoolbox.com/pipe-velocity-d_1096.html.
34. *TEST DE DIXON, RECHERCHE DE VALEUR ABRANTES*, in *PY-MATH*. 2013. p. 57-63.
35. Foldyna, J., et al., *Erosion of metals by pulsating water jet*. Tehnicki Vjesnik, 2012. **19**(2): p. 381-386.

ANNEXES

Annexe 1 : Protocole de l'érosion par la pluie

1. Introduction

L'appareil utilisé est spécialement adapté pour mesurer le taux d'érosion par la pluie des revêtements commerciaux et en développement. L'érosion est obtenue en projetant un jet d'eau générant une goutte de pluie de 2 mm venant frapper sur le revêtement candidat, préalablement appliqué sur une lame d'aluminium. Les impacts des gouttes d'eau projetées provoquent l'érosion du revêtement à cette position. Lorsque des dommages visibles sont observés sur au moins quatre sites d'impact sur cinq le nombre d'impacts est mesuré. Le schéma de la **Figure A 1** montre le grillage des positions d'impacts retenues pour évaluer l'érosion par la pluie.

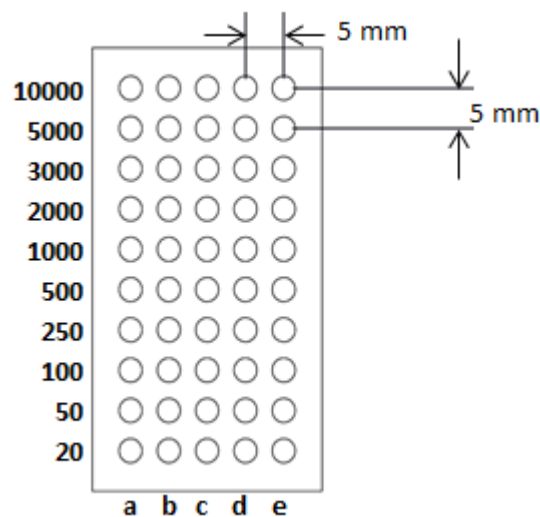


Figure A 1 : Grillage des sites d'impacts dispersés en dix rangées avec cinq sites par rangée

2. Matériels

- Échantillons : lame d'aluminium
- Microscope (Microsystems DG 20)
- Caméra (Canon EOS 70D)
- Appareil de mesure d'érosion par la pluie
- Pochoir du schéma du nombre d'impacts
- Fiche de l'essai d'érosion par la pluie

3. Fabrication des lames échantillons

Fabrication de 6 lames en aluminium 6061-T6 (**Figure A 2**) ou plus selon la demande du client par produit (revêtement) convenant au montage. Les dimensions de la lame sont : 3,18 cm de largeur, 34,00 cm de longueur et 0,63 cm d'épaisseur.

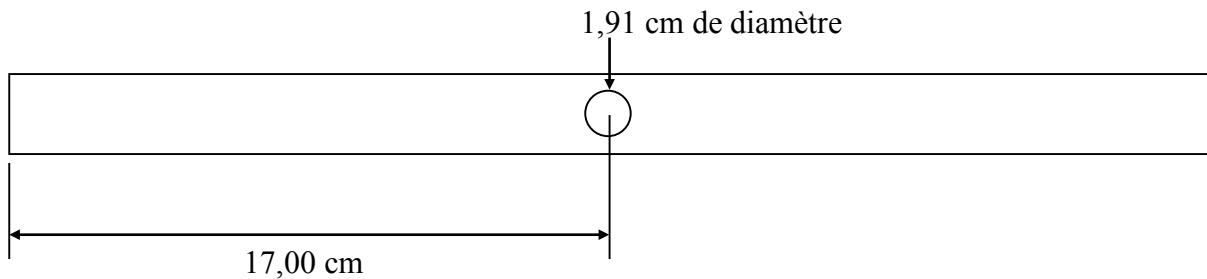


Figure A 2: Lame d'aluminium

4. Préparation des lames

4.1 Nettoyage des lames

L'aluminium servant à faire les lames est dégraissé en le plongeant dans un mélange d'agent dégraissant mélangé à de l'eau chaude du robinet. Les lames doivent être asséchées et remises au technicien pour le polissage. La lame nécessite un polissage avec un abrasif de finition lignée de type BLENDEX (**Figure A 3**) en passant une fois aller sur chacune des quatre faces de la lame.

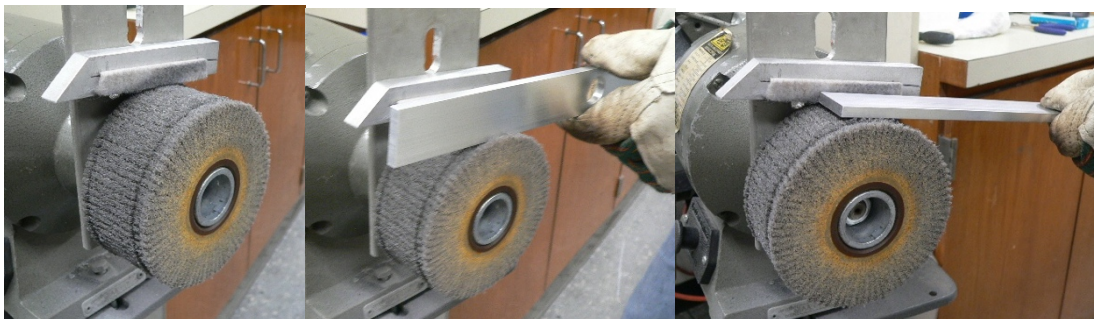


Figure A 3: Abrasif de finition lignée de type BLENDEX

4.2 Identification des lames

La numérotation des lames est effectuée par burinage au centre près de l'orifice d'attache. Elle comprend une lettre suivie de trois chiffres (le numéro étant déterminé selon l'ordre chronologique de fabrication dans la séquence suivante : A001, A002, ..., A999, B001, ..., B999, C001...). Un lavage des lames doit être effectué à l'aide d'un savon à vaisselle. Par la suite les lames sont lavées à nouveau dans un bain d'éthanol avant d'être bien asséchées. Chaque lame doit être pesée avec une balance de précision de $\pm 0.01\text{g}$. Le formulaire de numérotation et de pesée est conservé au dossier du projet concerné.

4.3 Expédition des lames au client pour application du revêtement à étudier

Les lames sont expédiées au client en lui précisant l'emplacement du revêtement sur la lame (**Figure A 4**).

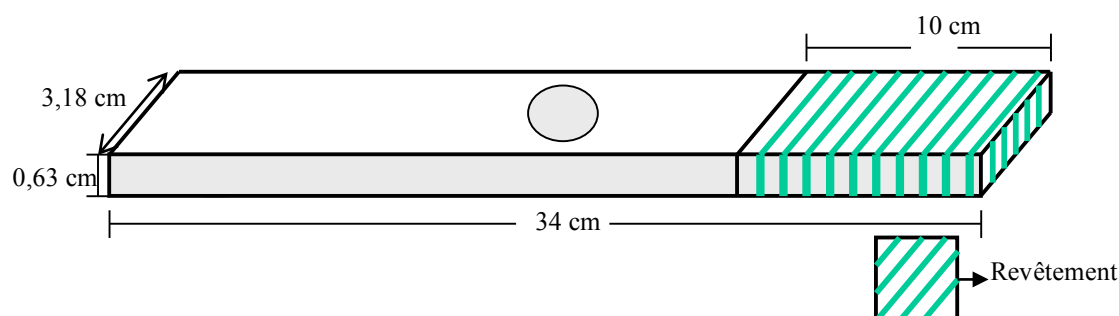


Figure A 4: Modèle d'application du revêtement sur la lame d'aluminium

4.4 Préparation de la lame d'essai

Après la réception de la lame, le revêtement appliqué sur les côtés doit être enlevé à l'aide d'un couteau (**Figure A 5**) afin que la lame soit en mesure d'être insérée correctement dans le support de fixation.

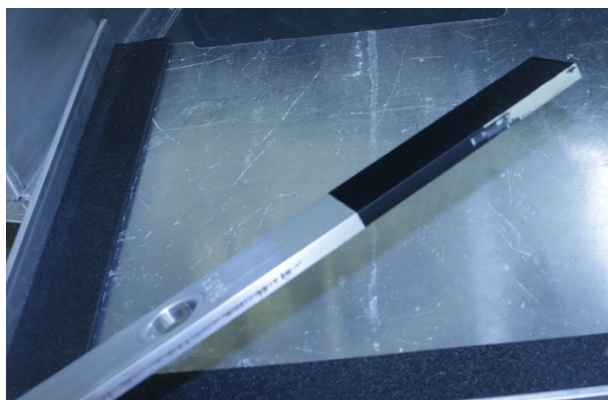


Figure A 5: Lame d'essai sans le revêtement sur les côtés

5. Préparation de l'essai d'érosion par la pluie

5.1 Remplir les deux premières sections (essai et paramètres) de la fiche d'essai d'érosion par la pluie en utilisant le formulaire FOR-EN123.

5.2 Incrire dans le programme d'érosion par la pluie de l'ordinateur de contrôle toutes les informations concernant l'essai, dont le nombre d'impacts à effectuer sur le revêtement, puis appuyer sur l'icône **valider** (Figure A 6).

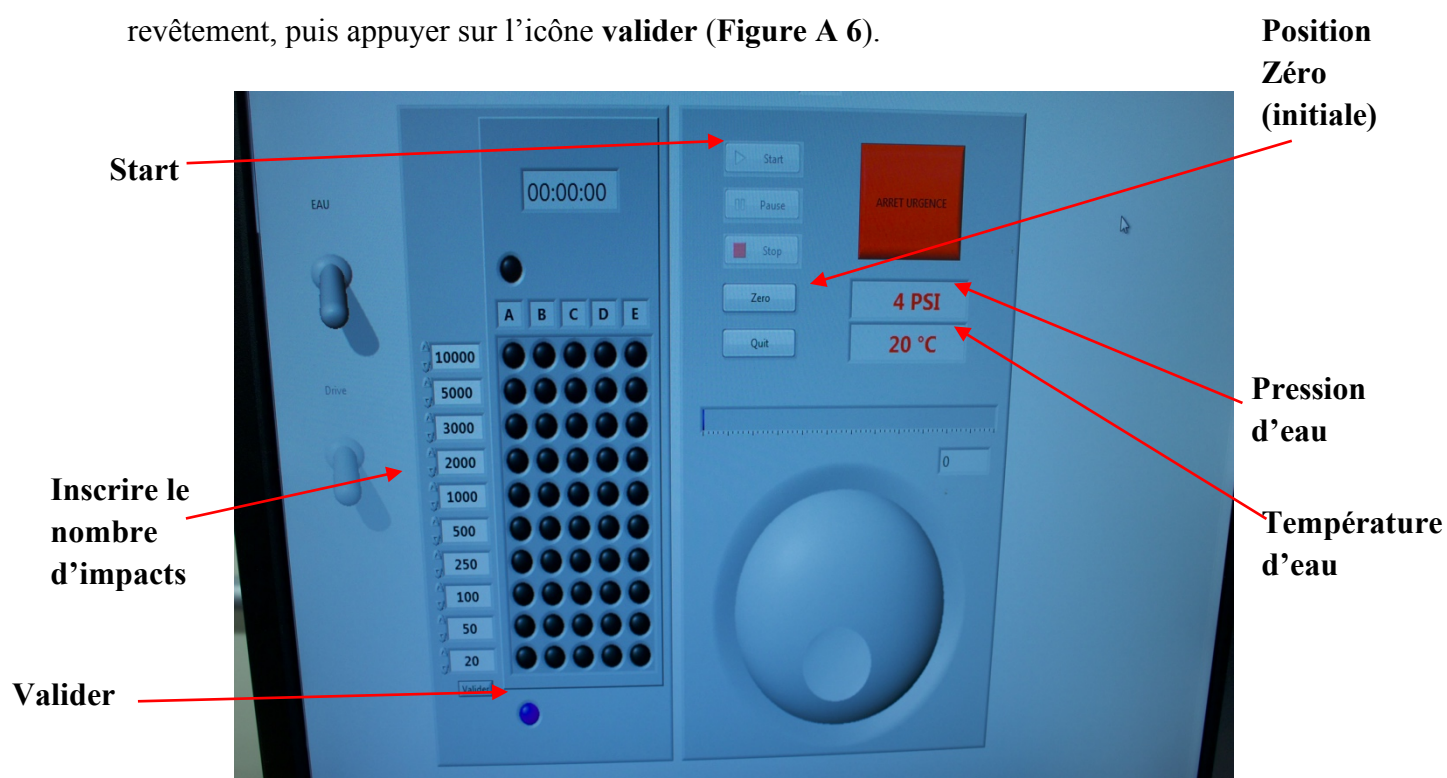


Figure A 6: Configuration du panneau de contrôle

5.3 Placer la lame d'essai dans le support du montage (**Figures A 7**) et la fixer à l'aide de la vis (**Figure A 8**).

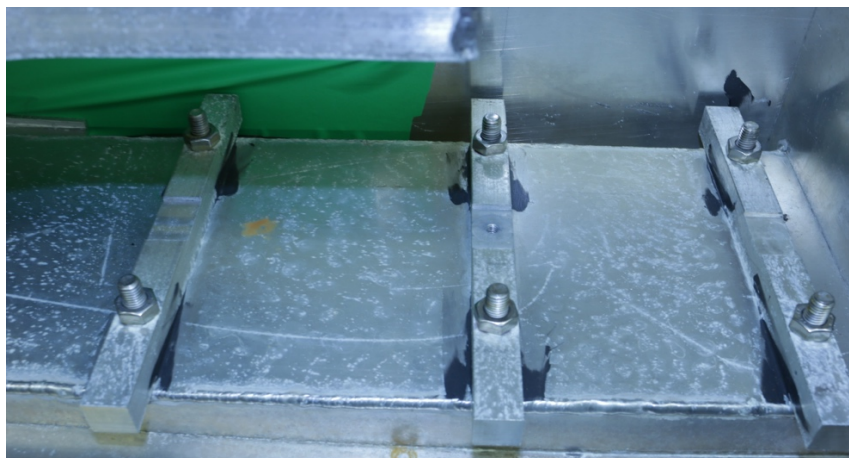


Figure A 7: Emplacement de la lame d'essai

Bande
élastique en
caoutchouc

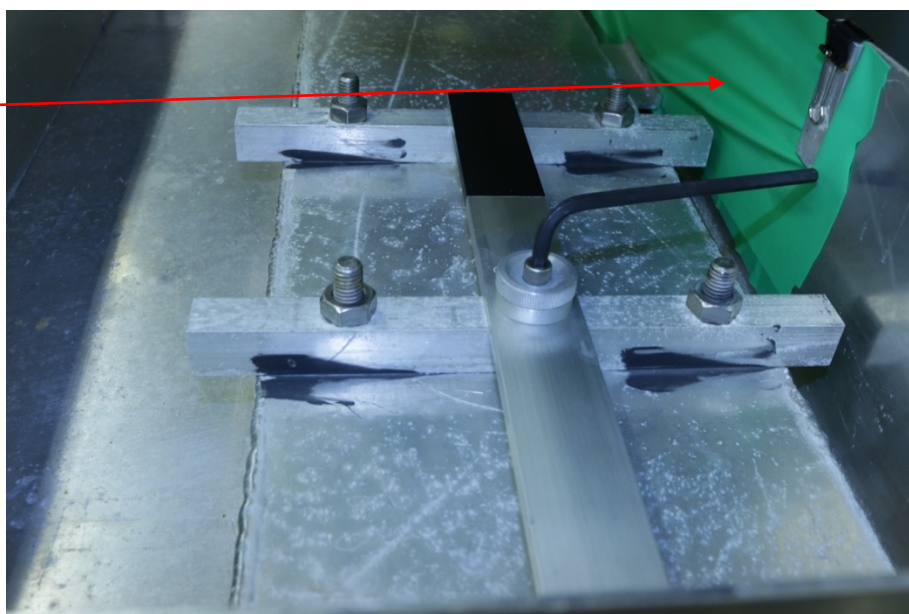


Figure A 8: Lame d'essai

5.4 À l'aide de la poignée, faire descendre la partie supérieure du montage jusqu'à ce que les deux flèches soient vis-à-vis (**Figure A 9**). Voir à ce que la bande élastique en caoutchouc derrière le montage soit bien étirée, pour éviter le déversement d'eau (figure 8).

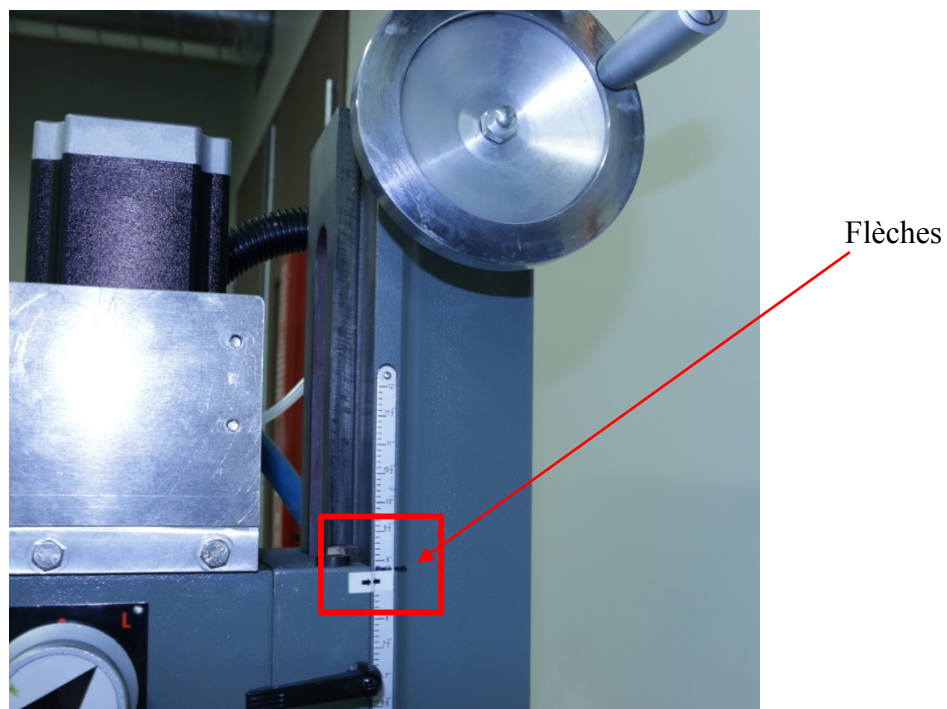


Figure A 9: Positionnement de la lame d'essai sous la buse

5.5 Recouvrir le montage de panneaux protecteurs afin d'éviter les éclaboussures (**Figure A 10**).

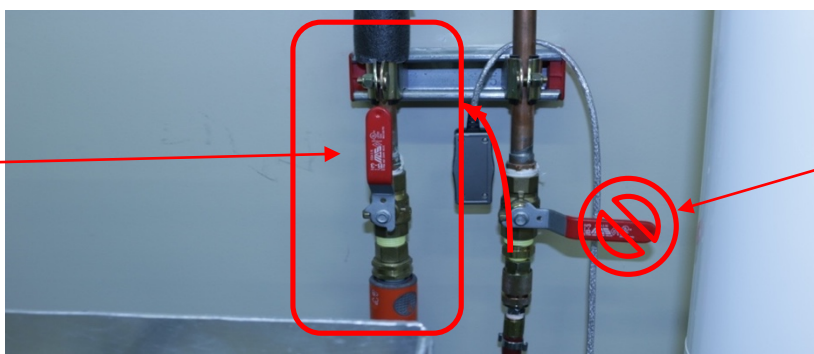


Figure A 10: Montage prêt à être utilisé

5.6 Ouvrir la valve de sortie d'eau (**Figure A 11**) en la tournant dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. La poignée devient parallèle au tuyau de sortie d'eau. Brancher le ventilateur pour éviter la surchauffe du moteur, ouvrir le sectionneur d'alimentation électrique (**Figure A 12**) ainsi que le bouton rouge du bornier de connexion (**Figure A 13**).

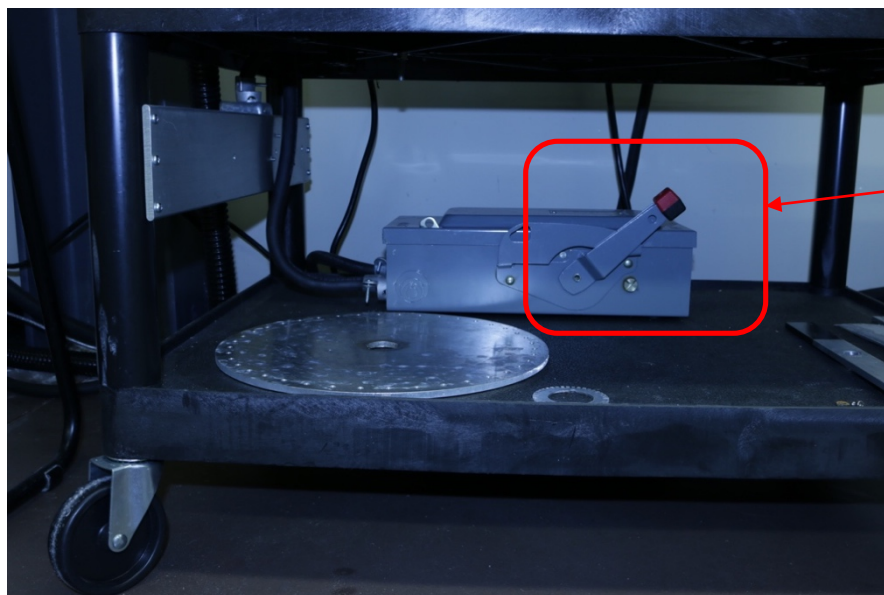
Sortie d'eau : Ouverte
(poigné rouge dans le
même sens que le
tuyau)

Tourner dans le sens
contraire des aiguilles
d'une montre pour
ouvrir la sortie d'eau.



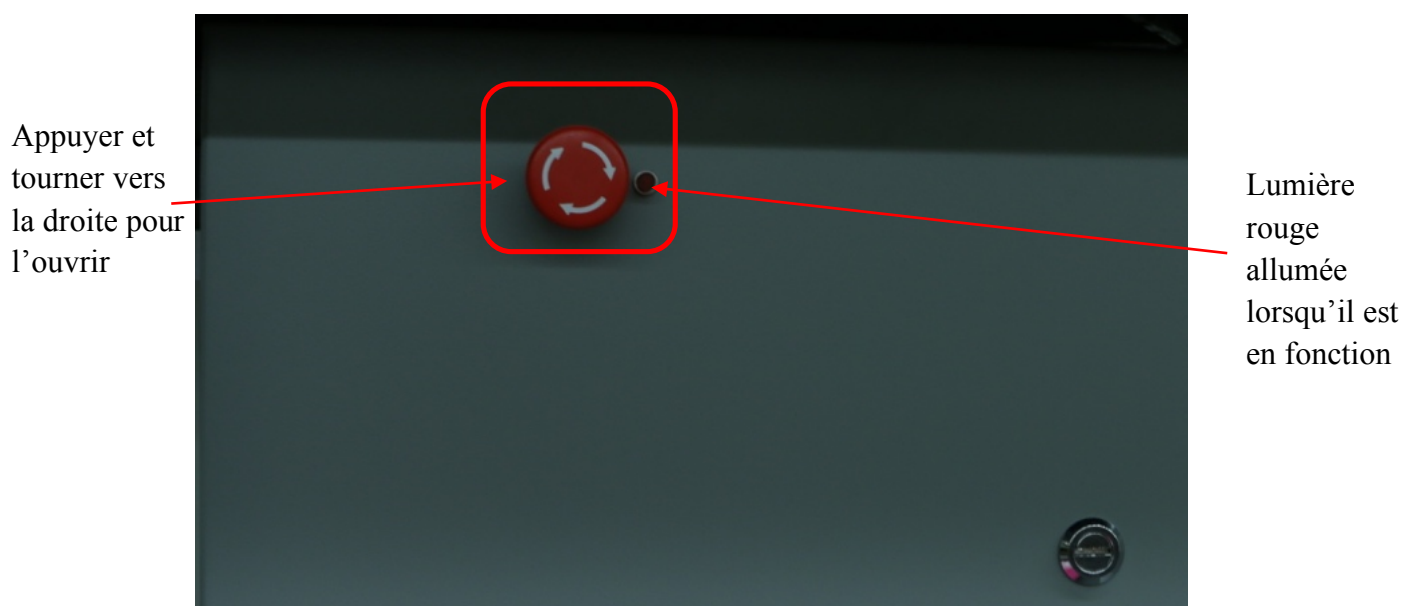
Ne pas toucher
(poigné de droite)

Figure A 11: Poignée de sortie d'eau en position ouverte



Sectionneur
d'alimentation
ouvert

Figure A 12: Sectionneur d'alimentation électrique en position



Appuyer et
tourner vers
la droite pour
l'ouvrir

Lumière
rouge
allumée
lorsqu'il est
en fonction

Figure A 13: Commutateur électrique

5.7 Lorsque toutes les étapes précédentes sont complétées, appuyer sur l'icône « Zero » dans le programme de l'ordinateur de contrôle. Attendre que la position initiale soit atteinte puis appuyer sur l'icône « Start » (**Figure A 5**).

6. Résultats

6.1 Lorsque l'essai est complété, retourner sur l'écran d'accueil de l'ordinateur de contrôle (**Figure A 14**), pour récupérer le dossier de calibration de la pression et de température de l'eau.

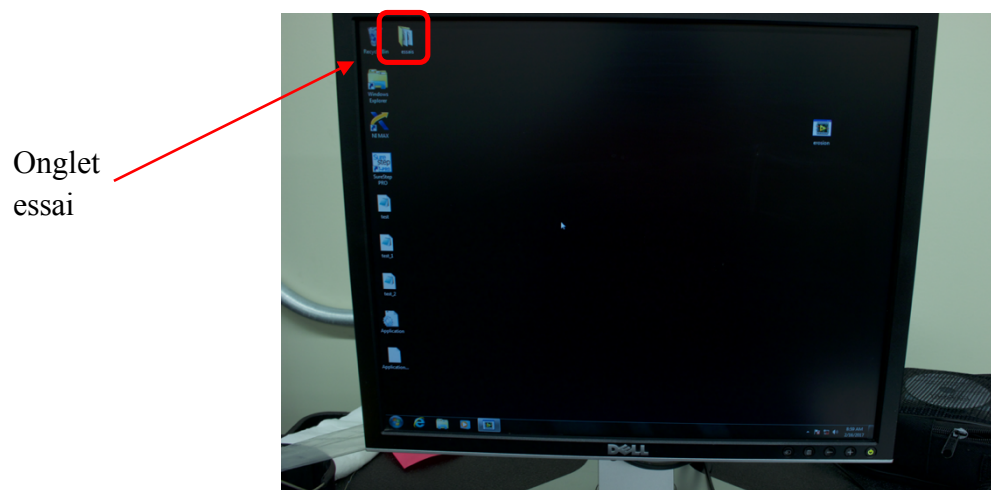


Figure A 14: Écran d'accueil de l'ordinateur de contrôle

6.2 Par la suite, utiliser le pochoir du nombre d'impacts pour évaluer le taux d'érosion (**Figure A 15**), prendre les photos de chaque site d'impacts à l'aide du microscope (**Figure A 16**) de même qu'une photo d'ensemble à l'aide de la caméra (**Figure A 17**).

- Pour le microscope, utilisez le grossissement 5x
- Pour la caméra, utilisez les réglages présentés à la **Figure A 18**

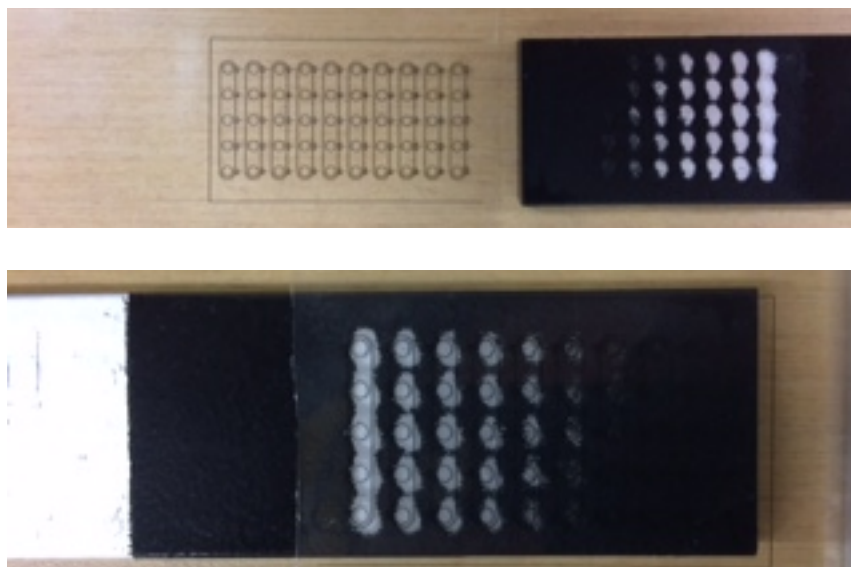


Figure A 15: Évaluation du taux d'érosion à l'aide du pochoir



Figure A 16: Prise de photos des sites d'impacts à l'aide du microscope

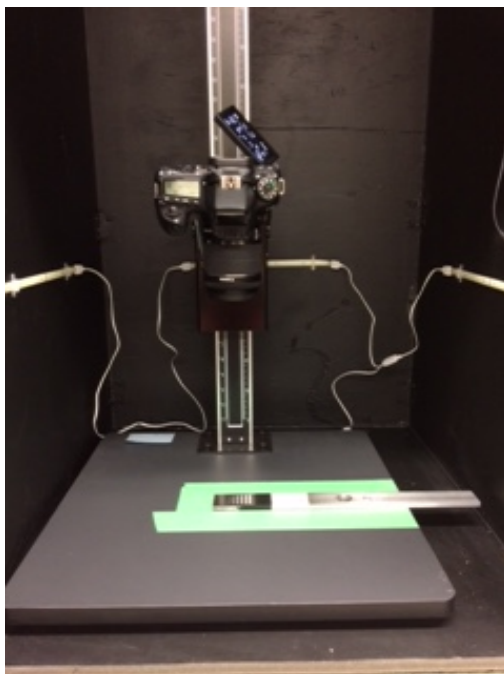


Figure A 17: Montage pour la caméra



Figure A 18: Réglage des paramètres de la caméra Canon EOS 70D

6.3 Enfin, remplir la fiche d'essai en y insérant les photos et les renseignements pertinents. Le critère d'échec correspond à l'apparition de dommages visibles sur au moins quatre sites d'impacts érodés sur cinq.

Annexe 2 : Fiches d'essais

A.2.1 Peinture de fuselage pour les avions



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

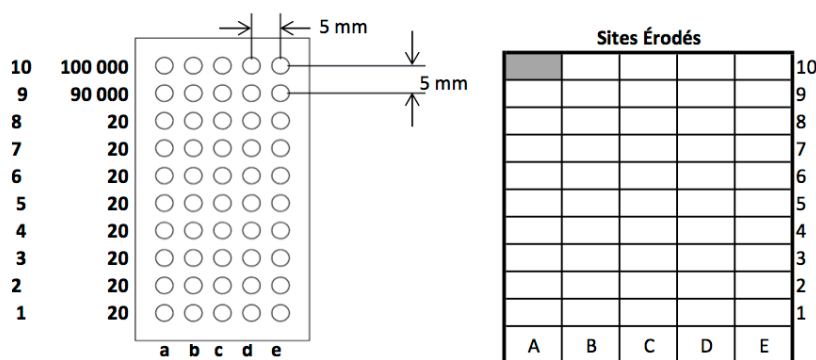
ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA): 27-04-2016 et 28-04-2016
Essai : Essai 3

PARAMÈTRES

Fournisseur	Air Craft Paint
Nom dossier pour calibration	Test_Erosion_12 et_13
# de la poutre	B668
Nombre d'impacts (départ)	20
Nombre d'impacts (fin)	100 000
Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)	2258 \pm 103 et 2265 \pm 99
Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)	2,5 \pm 0,9 et 3,0 \pm 2,0
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)	03:10:31 et 03:31:42

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

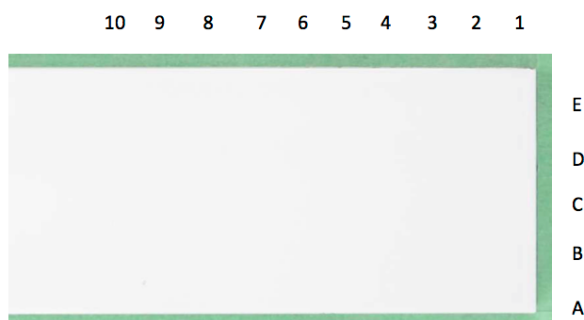
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	3E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A	8B	8C	8D	8E
9A	9B	9C	9D	9E
10A	10B	10C	10D	10E

PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

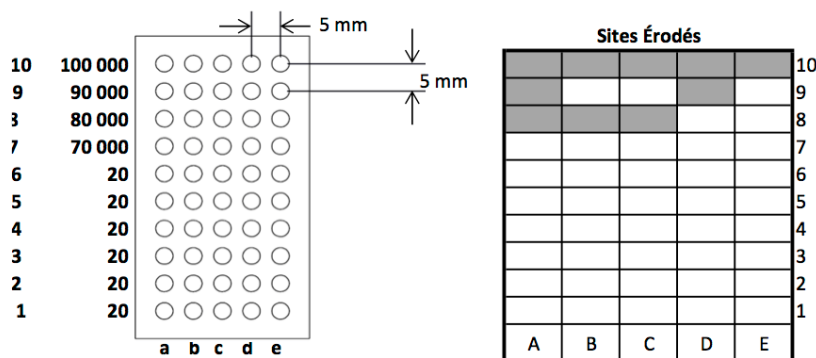
ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA): 02-05-2016, 03-05-2016, 04-05-2016 et 05-05-2016
 # Essai : Essai 4

PARAMÈTRES

Fournisseur: Air Craft Paint
 Nom dossier pour calibration: Test_Erosion_14, 16, 17 et 18
 # de la poutre: B674
 Nombre d'impacts (départ): 20
 Nombre d'impacts (fin): 100 000
 Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi): 2262 \pm 107, 2299 \pm 121, 2329 \pm 109 et 2291 \pm 130
 Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C): 3 \pm 2, 2 \pm 2, 3 \pm 2 et 3 \pm 2
 Durée de l'essai (heures:minutes:secondes): 03:10:33, 02:49:23, 03:31:42 et 02:28:14

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



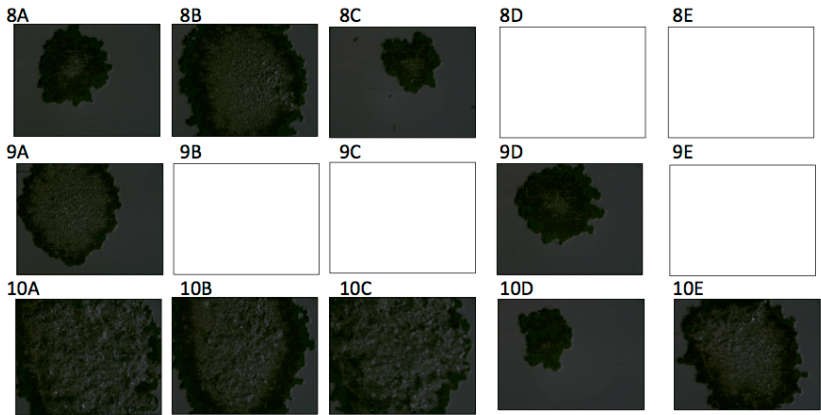
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

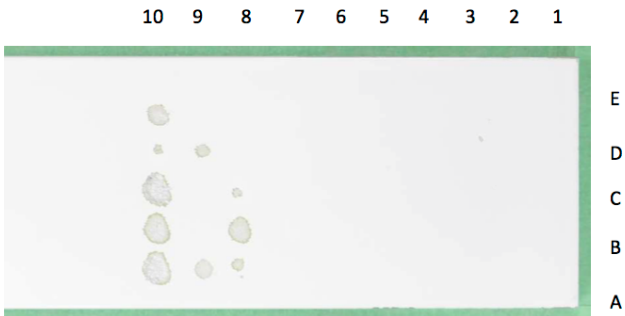
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	3E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

10, 11, 16, 17, 24, 26 et 30-05-2016

Essai :

Essai 5

PARAMÈTRES

Fournisseur

Air Craft Paint

Nom dossier pour calibration

Test_erosion_21, 22, 23, 24, 26, 28 et 30

de la poutre

B673

Nombre d'impacts (départ)

10 000

Nombre d'impacts (fin)

100 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2279 \pm 104, 2273 \pm 111, 2282 \pm 103, 2278 \pm 128

2278 \pm 117, 2285 \pm 112 et 2294 \pm 120

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

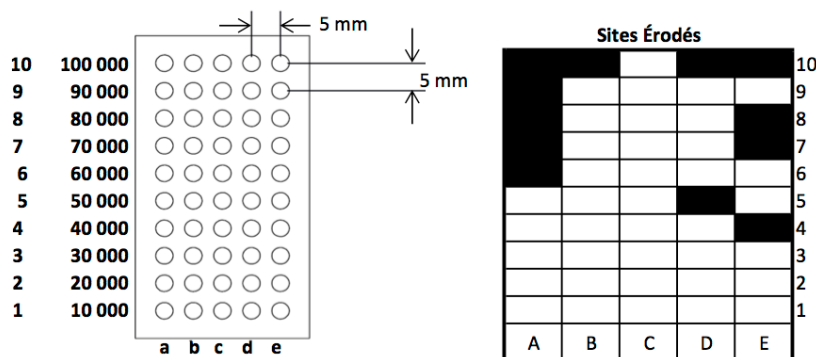
4 \pm 2, 3 \pm 2, 4 \pm 2, 4 \pm 2, 5 \pm 2, 6 \pm 2 et 7 \pm 2

Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

02:49:24, 03:10:35, 03:31:42, 02:28:16,

02:07:05, 03:09:19 et 02:06:03

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À GROSBOIS

1



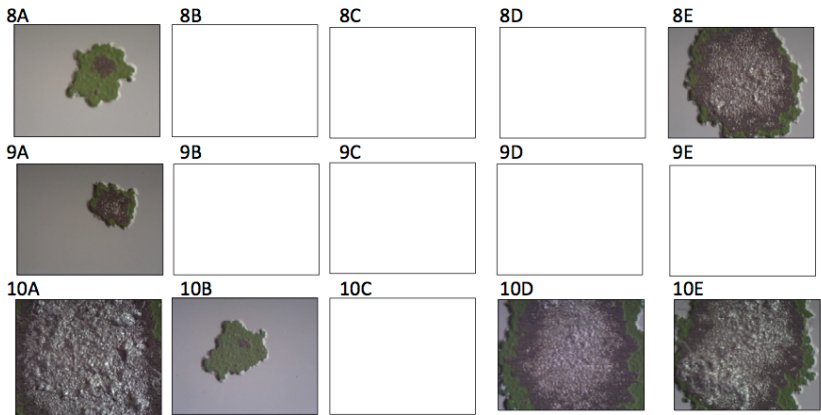
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

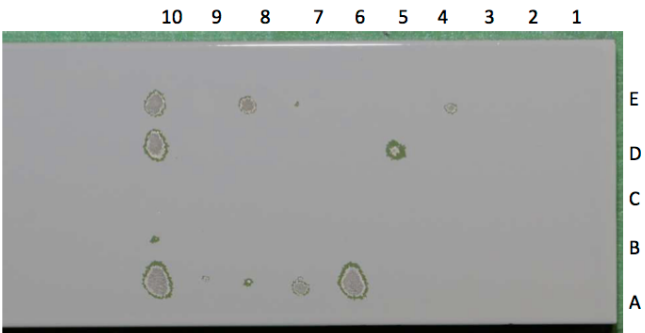
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	3E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

31-05-2016, 01, 06, 08, 13 et 15-06-2016

Essai :

Essai 6

PARAMÈTRES

Fournisseur

Air Craft Paint

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_32, _33, _34, _35 et _36

de la poutre

B672

Nombre d'impacts (départ)

40 000

Nombre d'impacts (fin)

100 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2295 \pm 128, 2299 \pm 118, 2270 \pm 157, 2286 \pm 112, 2299 \pm 112 et 2297 \pm 112

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

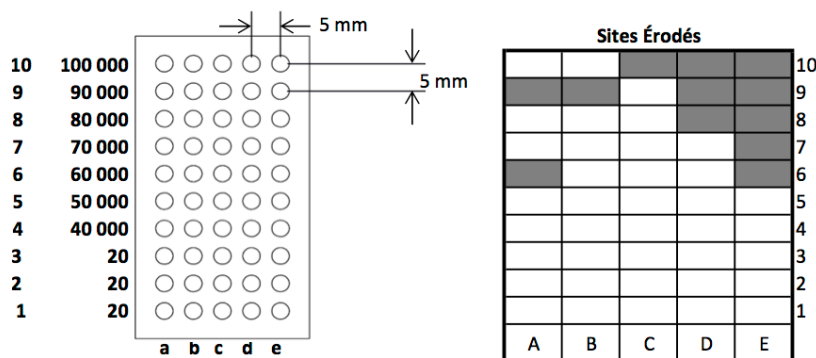
7 \pm 2, 7 \pm 2, 8 \pm 2, 8 \pm 2, 9 \pm 2 et 9 \pm 2

Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

02:23:13, 02:07:20, 03:09:18, 02:49:23,

03:10:38 et 03:31:42

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

1



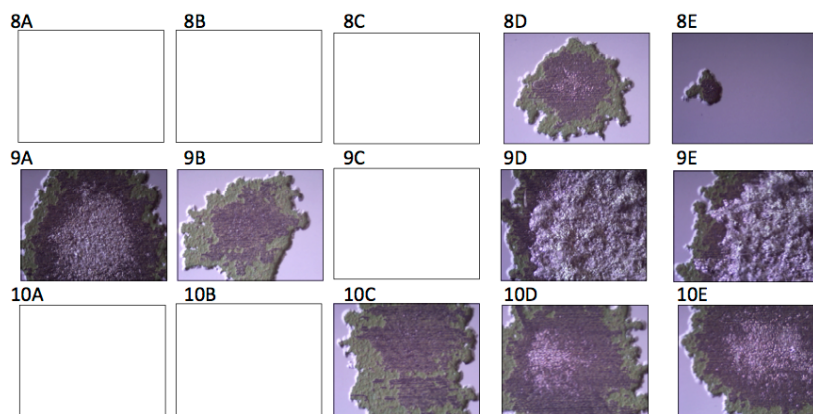
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

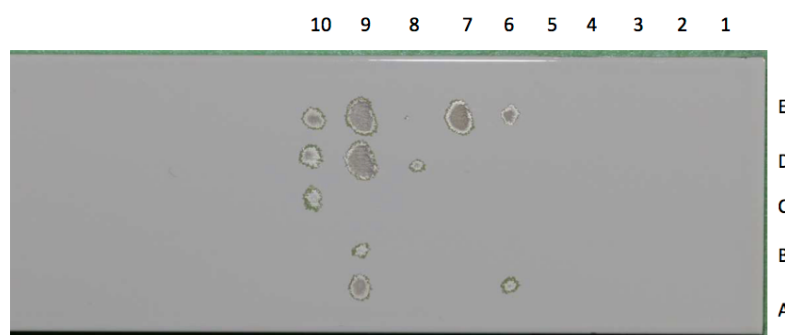
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	3E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



PHOTOS CAMÉRA CANON



A.2.2 Revêtement destiné au rotor d'hélices d'avions



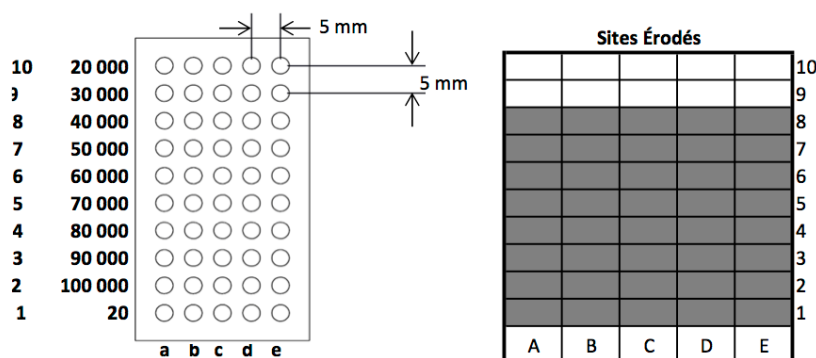
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA): 02, 04, 06, 07-07-2016
 # Essai : Essai 7

PARAMÈTRES

Fournisseur: Air Craft Paint
 Nom dossier pour calibration: Test_Erosion_37, 38, 39 et 40
 # de la poutre: B652
 Nombre d'impacts (départ): 20 000
 Nombre d'impacts (fin): 100 000
 Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi): 2282 \pm 119, 2300 \pm 117, 2282 \pm 123 et 2292 \pm 122
 Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C): 11 \pm 2, 12 \pm 2, 13 \pm 1 et 12 \pm 2
 Durée de l'essai (heures:minutes:secondes): 03:31:42, 05:59:38, 04:35:33 et 04:45:12

SCHÉMA DE L'ESSAI**NOTE SUR L'ESSAI**

Note:

Crée le 14-04-2016

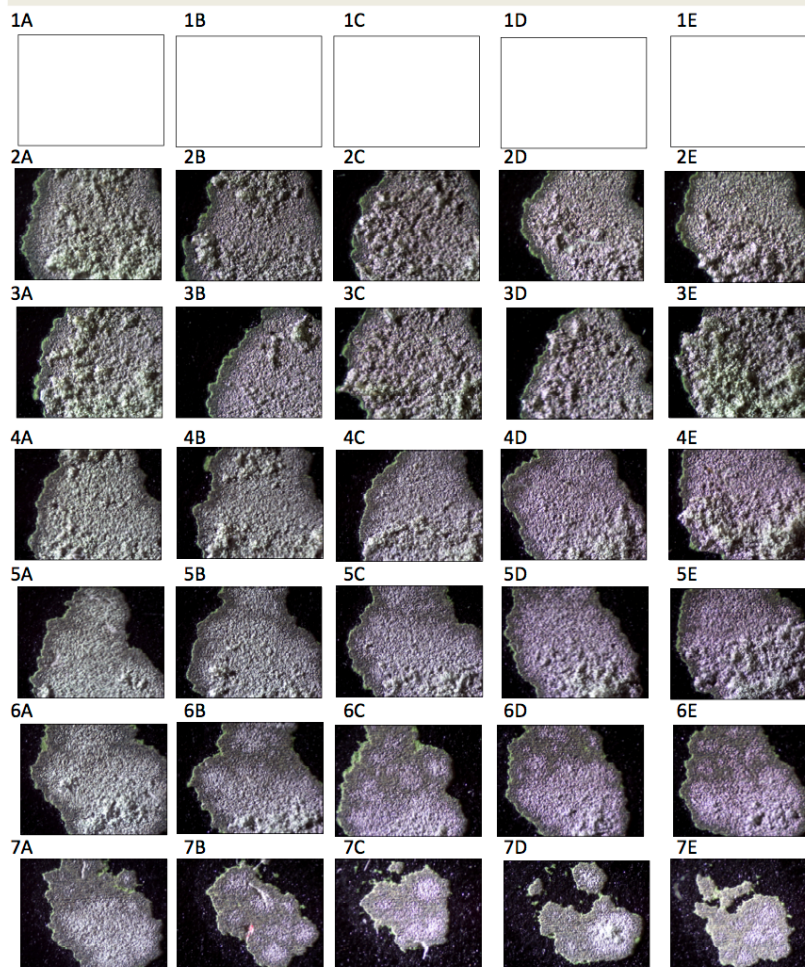
UQAC
 UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
 À GROSBOIS

1



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

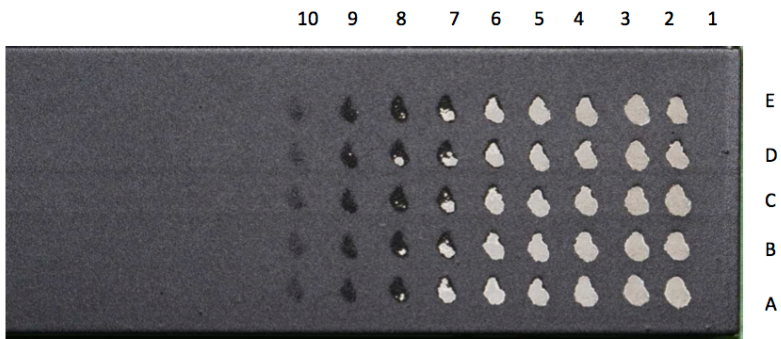




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A	8B	8C	8D	8E
9A	9B	9C	9D	9E
10A	10B	10C	10D	10E

PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

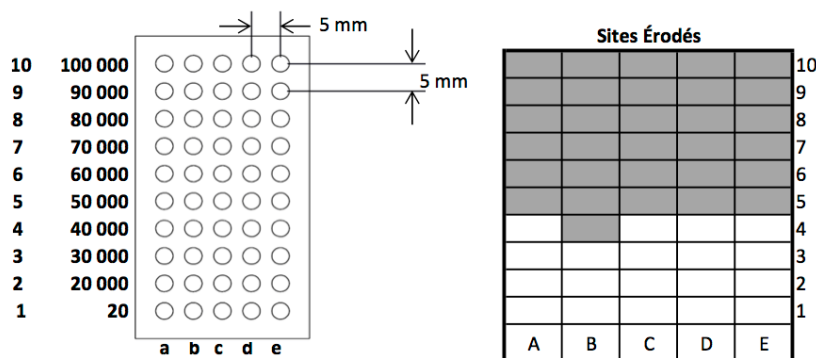
Date (JJ-MM-AAAA): 18-07-2016, 20-07-2016, 25, 26-07-2016, 01-08-2016 et 04-08-2016

Essai : Essai 13

PARAMÈTRES

Fournisseur	Air Craft Paint
Nom dossier pour calibration	Test_Erosion_43, 44 et 45
# de la poutre	B674
Nombre d'impacts (départ)	20 000
Nombre d'impacts (fin)	100 000
Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)	2294 \pm 114, 2279 \pm 184 et 2295 \pm 116
Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)	13 \pm 1, 14 \pm 5 et 14 \pm 2
Durée de l'essai (heures:minutes)	02:06, 03:09, 02:07, 02:28, 02:49, 03:10 et 03:31
Nombre d'impacts (apparition de dommages)	50 000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

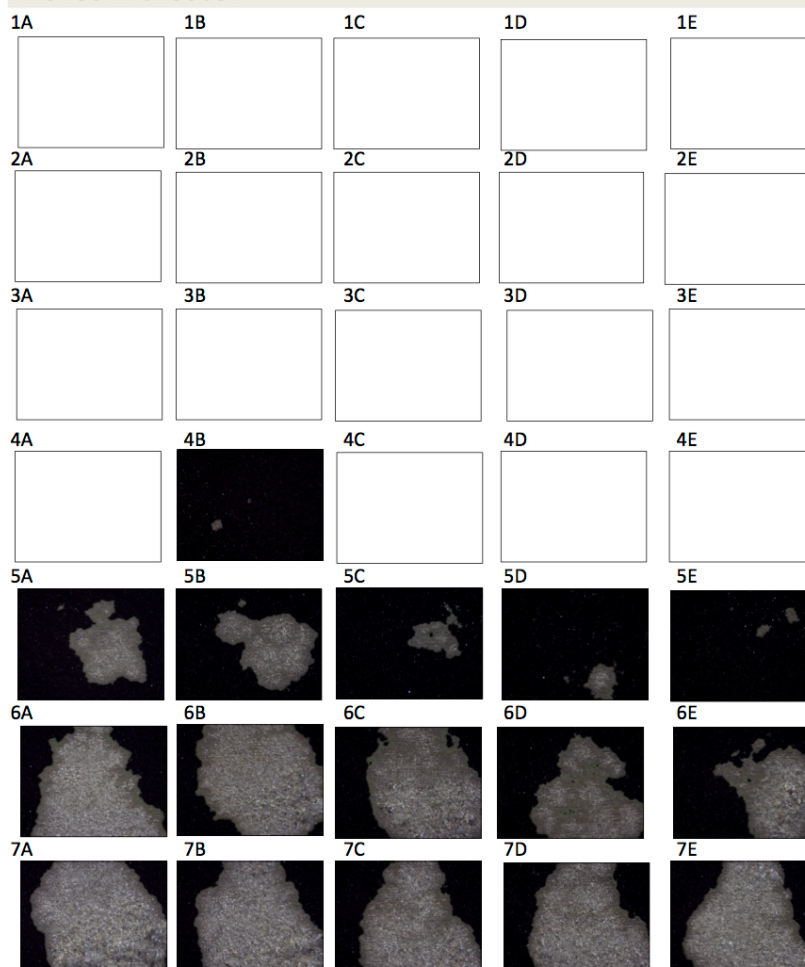
Note:

Crée le 14-04-2016



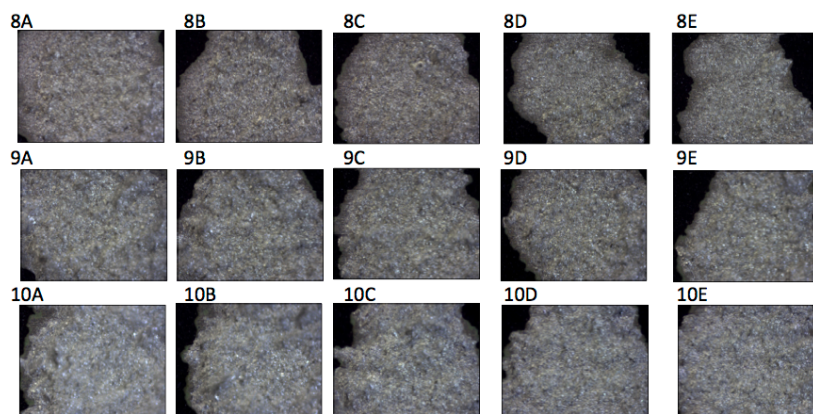
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

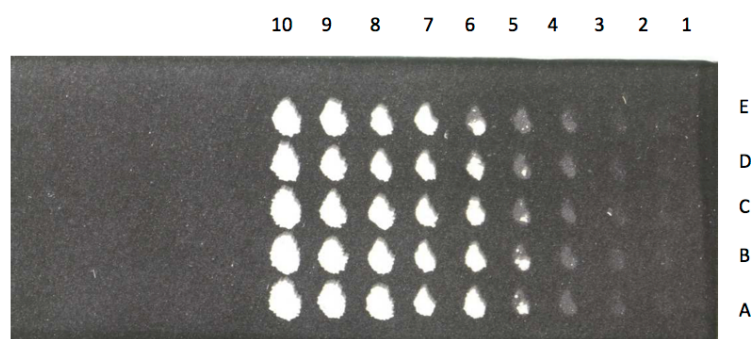




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



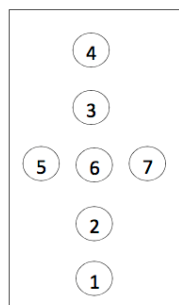
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	52	microns
2	50	microns
3	47	microns
4	52	microns
5	50	microns
6	56	microns
7	45	microns

A.2.3 Époxy à base d'eau



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

11-07-2016

Essai :

Essai 8

PARAMÈTRES

Fournisseur

Époxy à base d'eau

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_41

de la poutre

1 lot 1

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

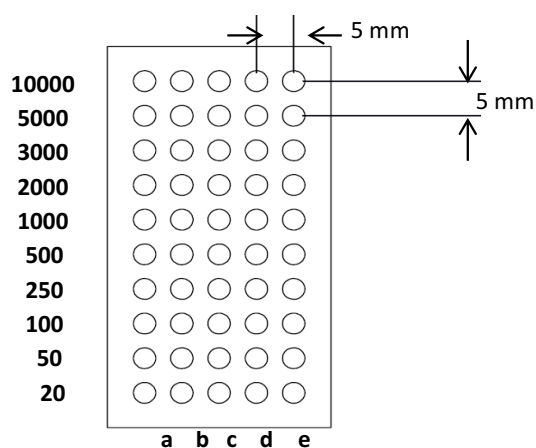
10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)2292 \pm 139Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)12 \pm 2

Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

SCHÉMA DE L'ESSAI



Sites Érodés					
					10
					9
					8
					7
					6
					5
					4
					3
					2
					1
A	B	C	D	E	

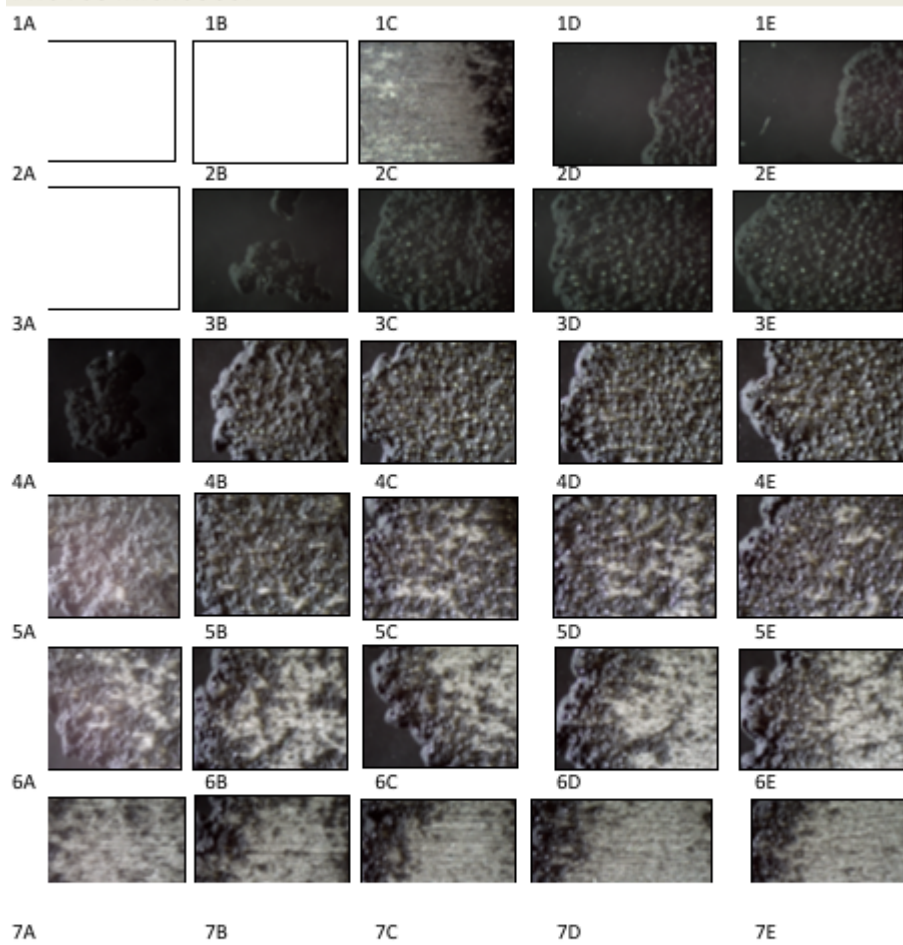
NOTE SUR L'ESSAI

Note:

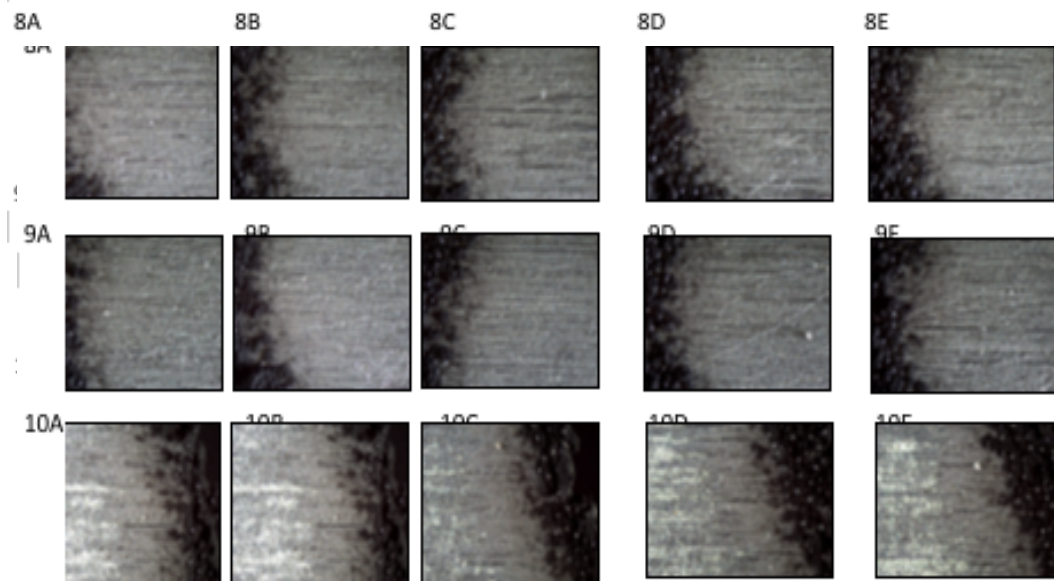
Crée le 14-04-2016

Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

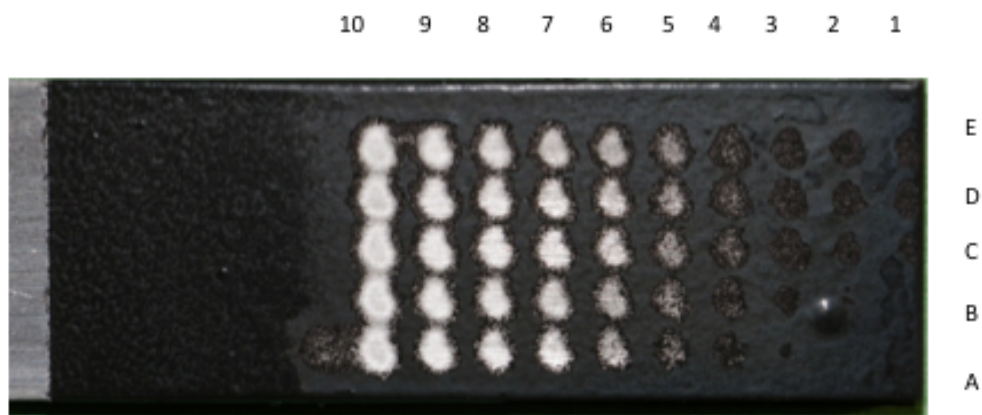
PHOTOS MICROSCOPE



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

11-07-2016

Essai :

Essai 9

PARAMÈTRES

Fournisseur

Époxy à base d'eau

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_41

de la poutre

2 lot 1

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2292 \pm 139

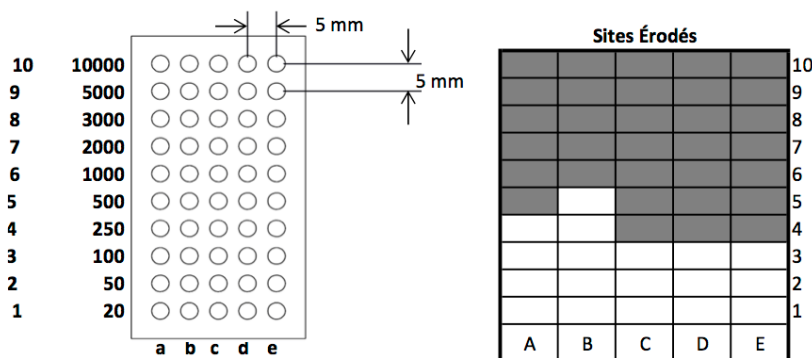
Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

12 \pm 2

Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

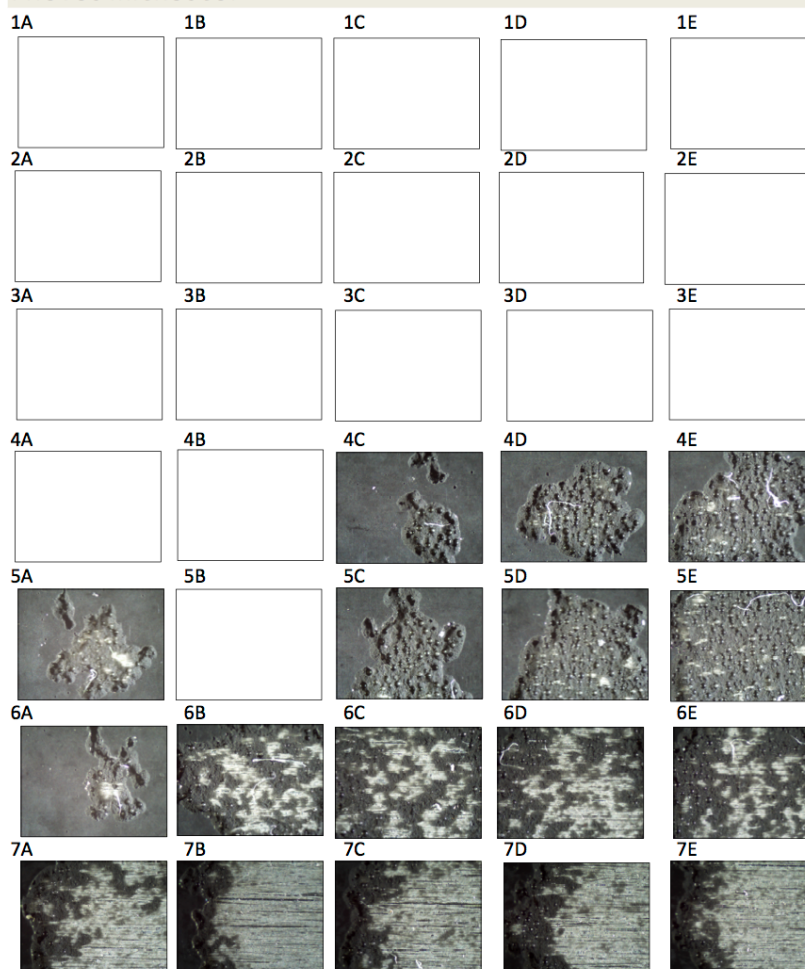
Note:

Crée le 14-04-2016



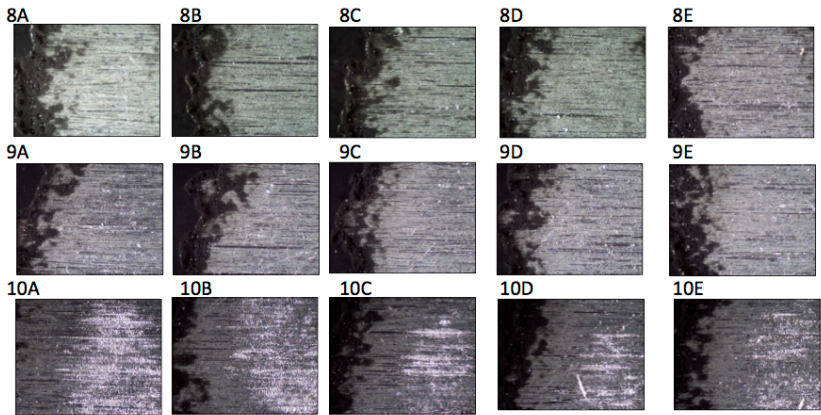
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

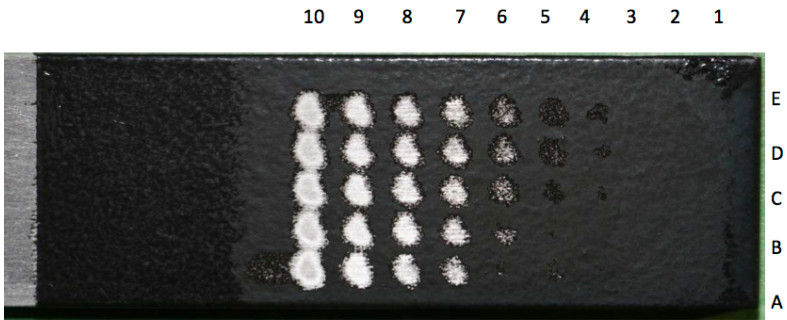




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

11-07-2016

Essai :

Essai 10

PARAMÈTRES

Fournisseur

Époxy à base d'eau

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_41

de la poutre

3 lot 1

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2292 \pm 138

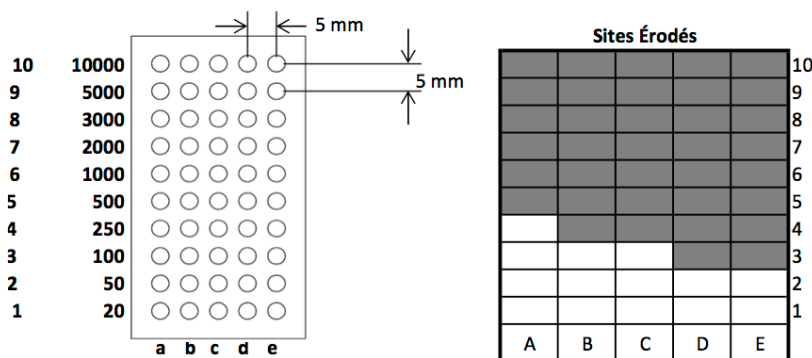
Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

12 \pm 2

Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

1



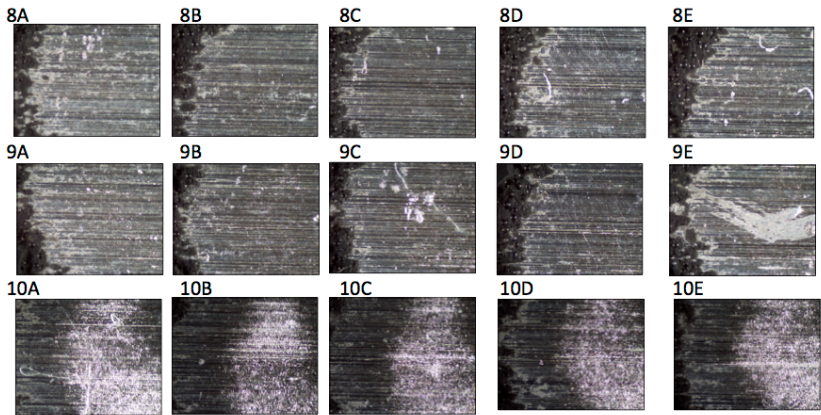
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

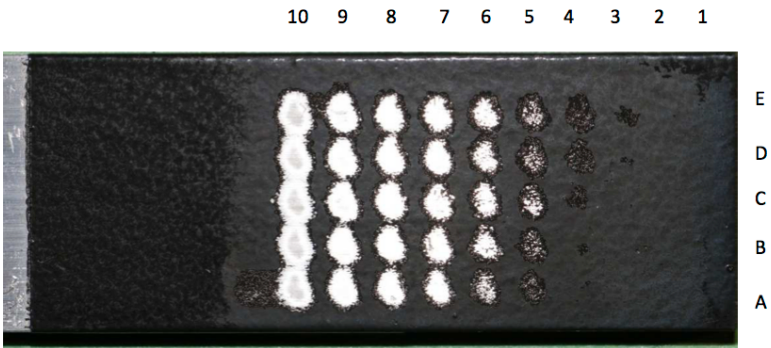




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

10-08-2016

Essai :

Essai 14

PARAMÈTRES

Fournisseur

Époxy à base d'eau

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_47

de la poutre

1 Lot2

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2298 \pm 133

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

15 \pm 2

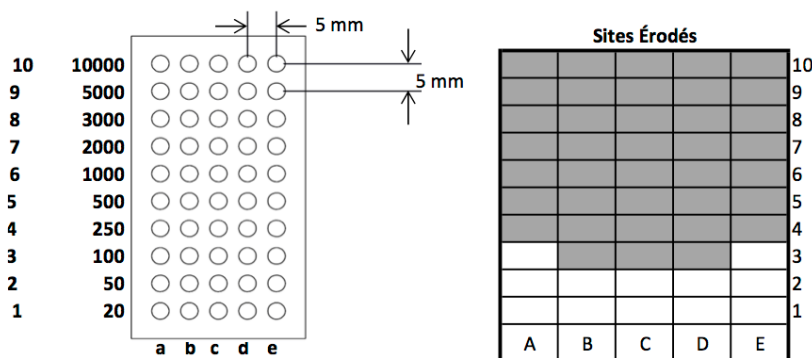
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

250

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

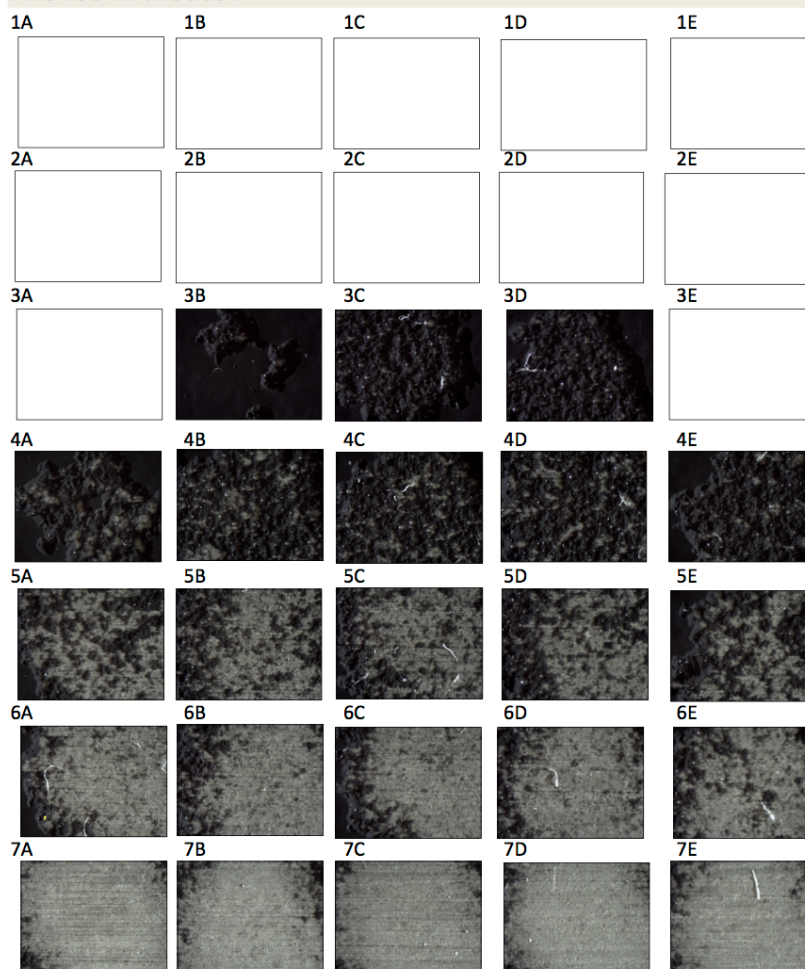
UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

1



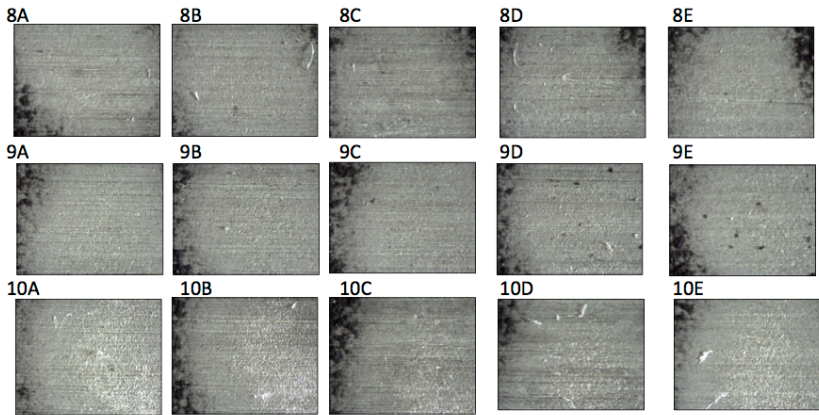
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

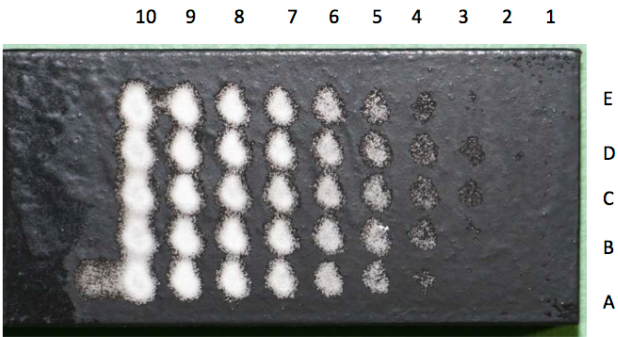




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



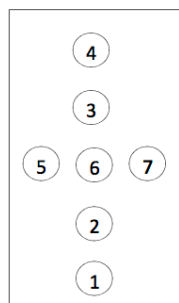
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	130	microns
2	130	microns
3	156	microns
4	130	microns
5	116	microns
6	160	microns
7	130	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

10-08-2016

Essai :

Essai 15

PARAMÈTRES

Fournisseur

Epoxy à base d'eau

Nom dossier pour calibration

Test_erosion_47

de la poutre

2 Lot2

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2291 \pm 145

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

15 \pm 1

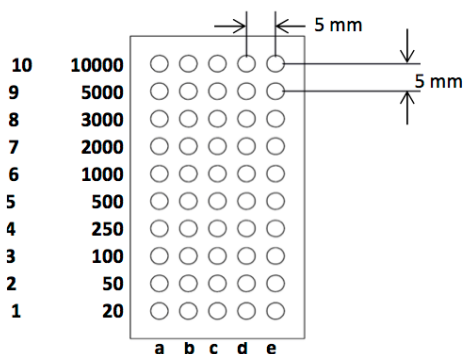
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

250

SCHÉMA DE L'ESSAI



Sites Érodés					
					10
					9
					8
					7
					6
					5
					4
					3
					2
					1
A	B	C	D	E	

NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

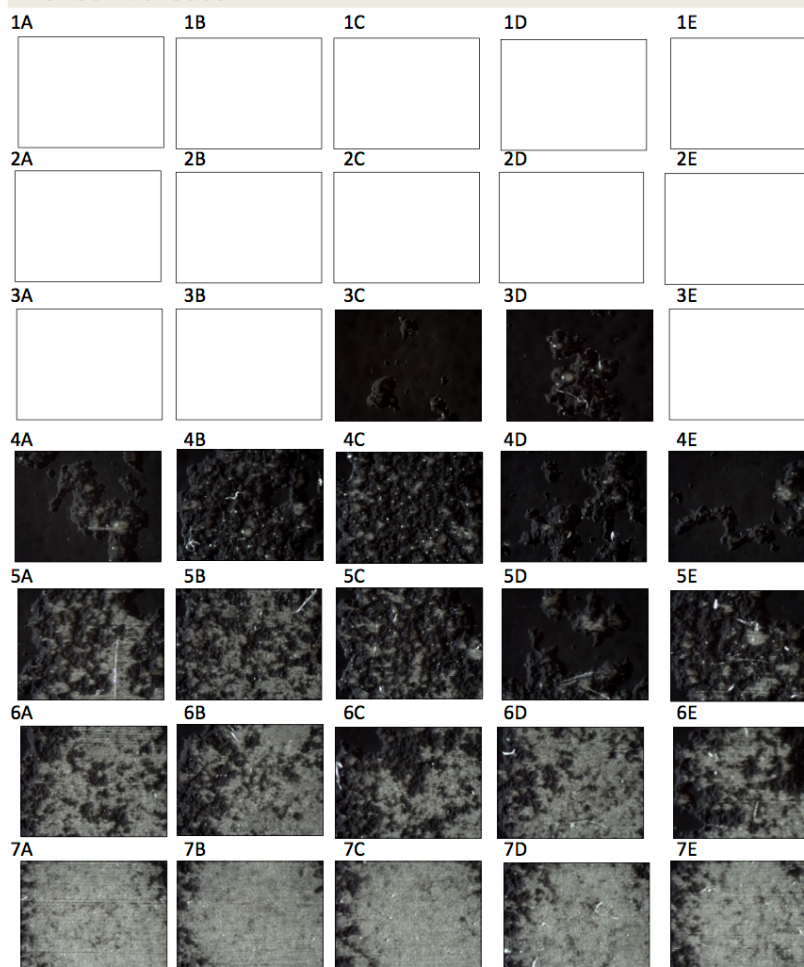
UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

1



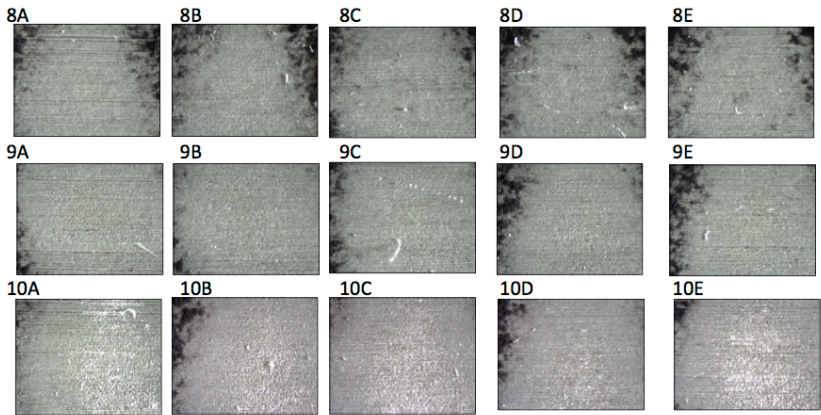
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

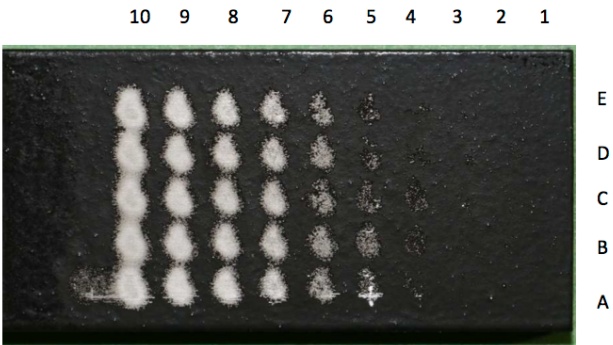




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



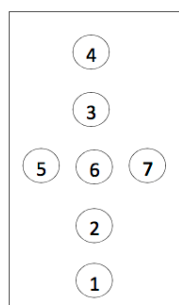
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	114	microns
2	120	microns
3	120	microns
4	106	microns
5	102	microns
6	110	microns
7	102	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

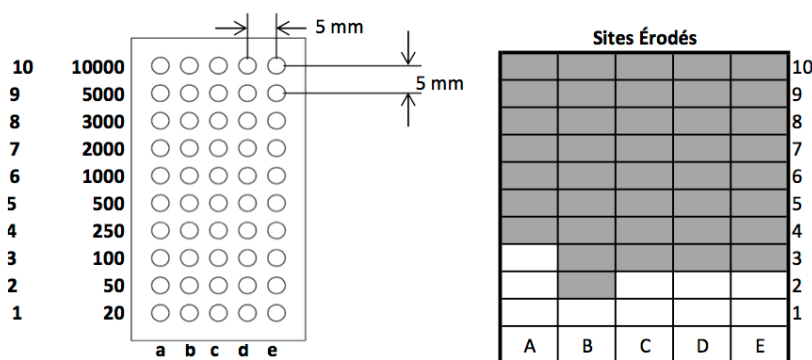
ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA): 10-08-2016
 # Essai : Essai 16

PARAMÈTRES

Fournisseur	Époxy à base d'eau
Nom dossier pour calibration	Test_Erosion_47
# de la poutre	3 Lot2
Nombre d'impacts (départ)	20
Nombre d'impacts (fin)	10 000
Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)	2290 \pm 137
Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)	15 \pm 1
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)	00:48:31
Nombre d'impacts (apparition de dommages)	100

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

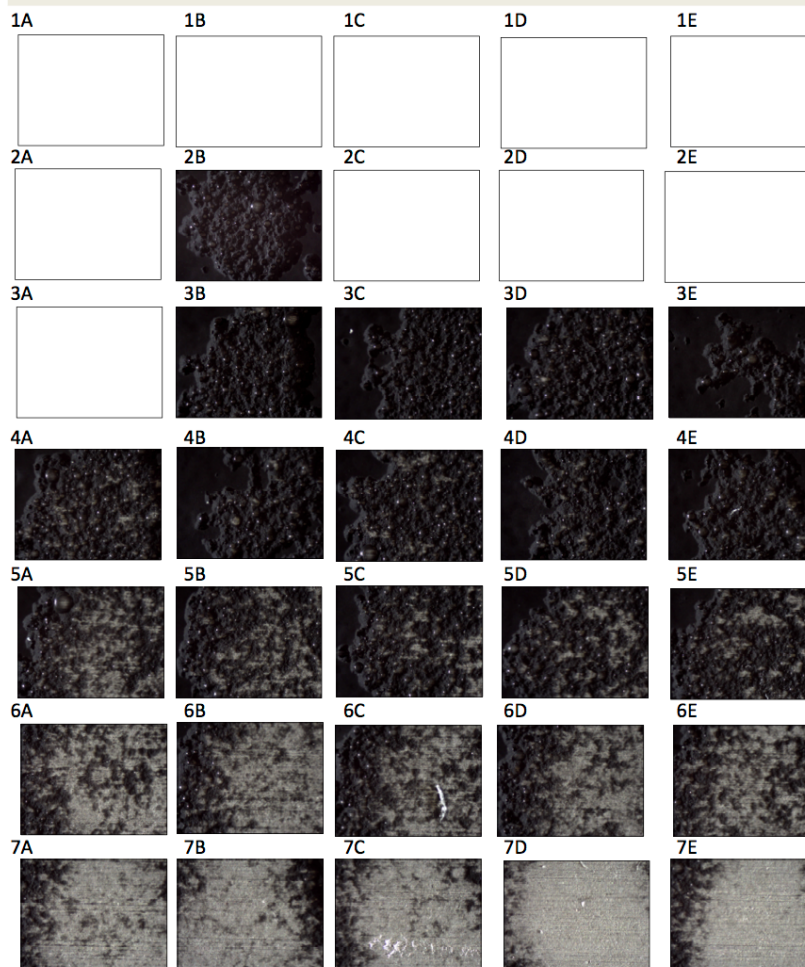
Note:

Crée le 14-04-2016



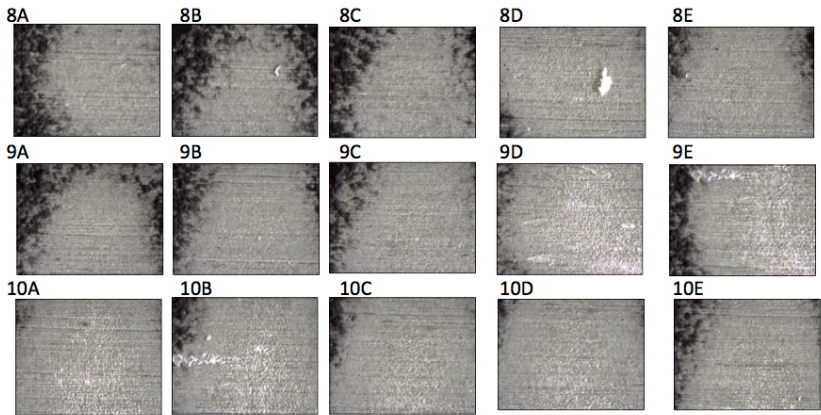
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

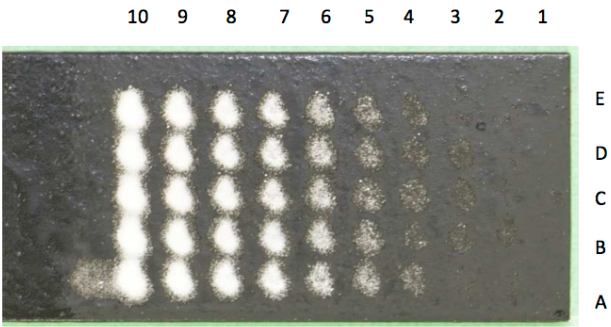




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



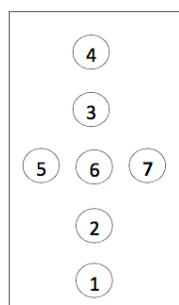
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	112	microns
2	128	microns
3	136	microns
4	108	microns
5	144	microns
6	118	microns
7	124	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

10-08-2016

Essai :

Essai 17

PARAMÈTRES

Fournisseur

Époxy à base d'eau

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_47

de la poutre

4 Lot2

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2289 \pm 134

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

15 \pm 1

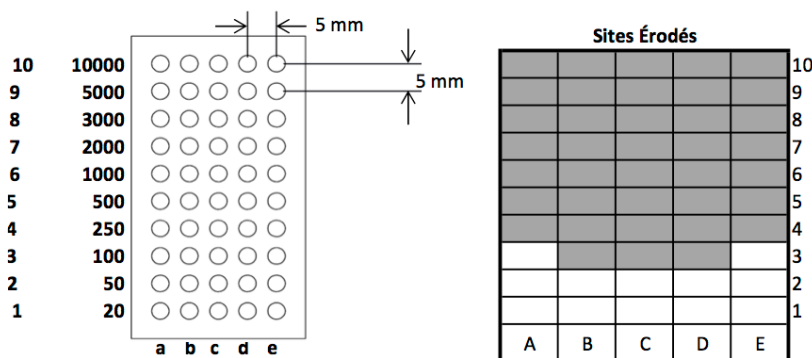
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

250

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

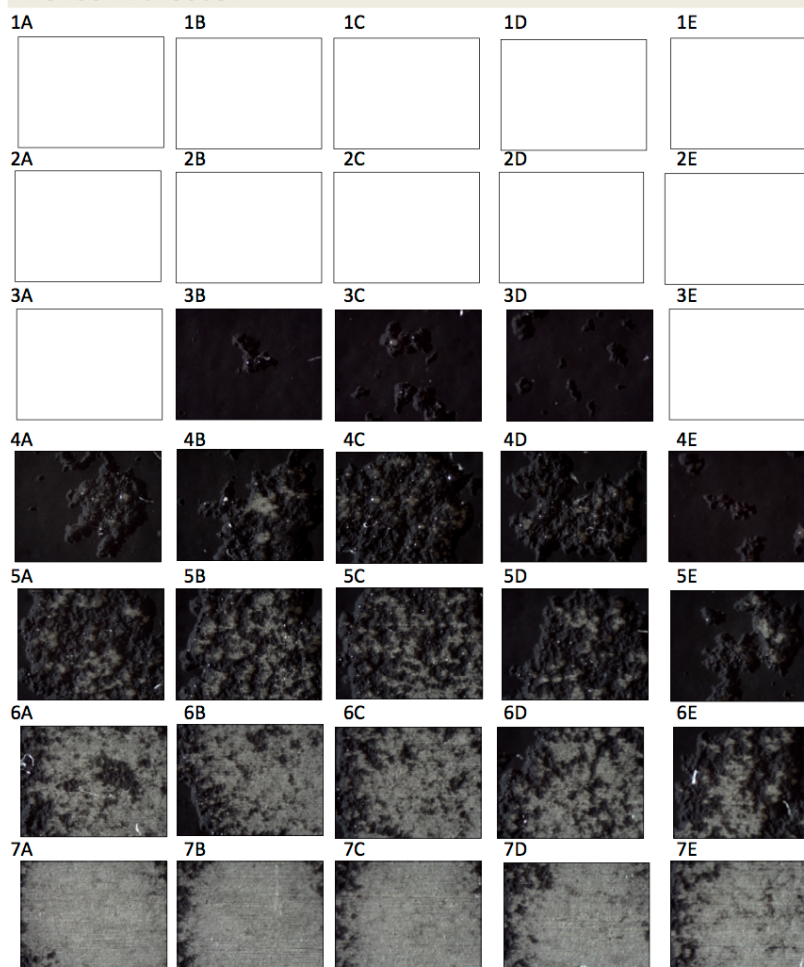
UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

1



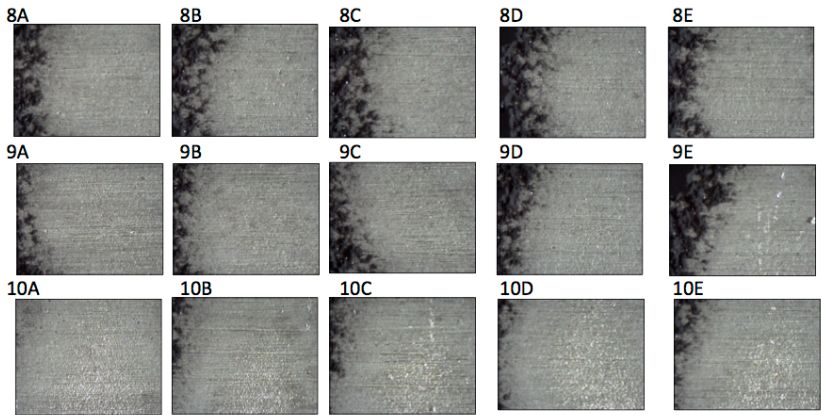
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

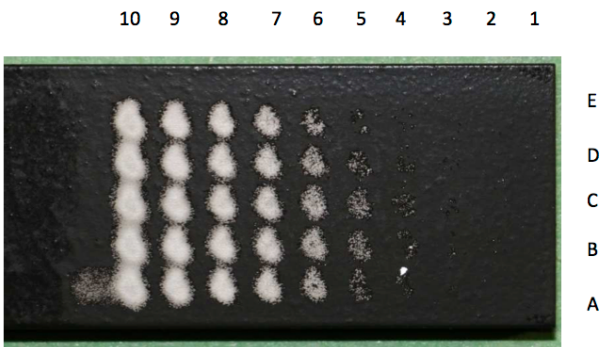




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



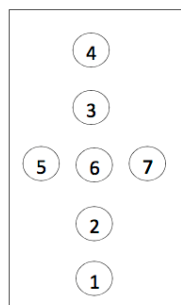
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	108 microns
2	114 microns
3	126 microns
4	126 microns
5	126 microns
6	118 microns
7	100 microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

10-08-2016

Essai :

Essai 18

PARAMÈTRES

Fournisseur

Epoxy à base d'eau

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_47

de la poutre

5 Lot2

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2289 \pm 134

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

15 \pm 1

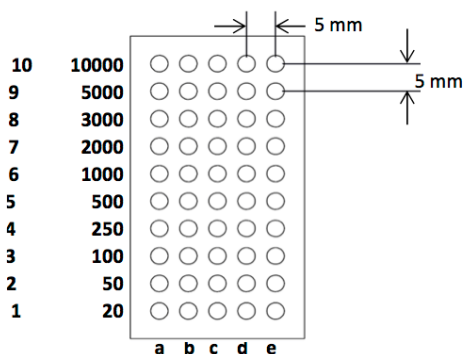
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

100

SCHÉMA DE L'ESSAI



Sites Érodés					
					10
					9
					8
					7
					6
					5
					4
					3
					2
					1
A	B	C	D	E	

NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

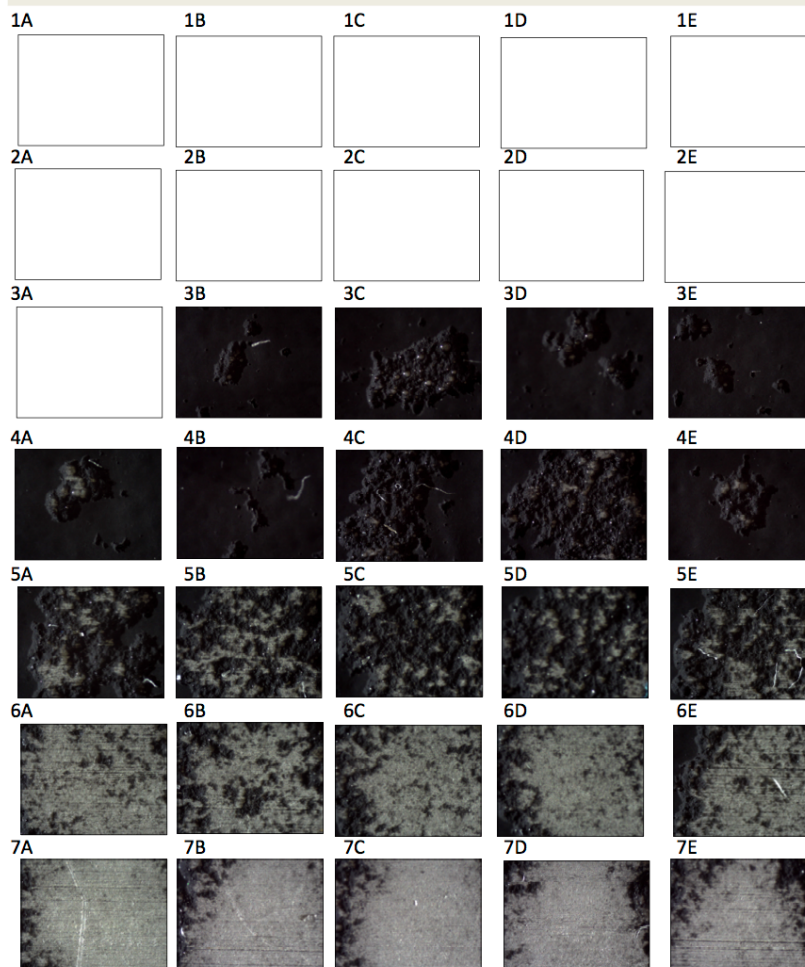
UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

1



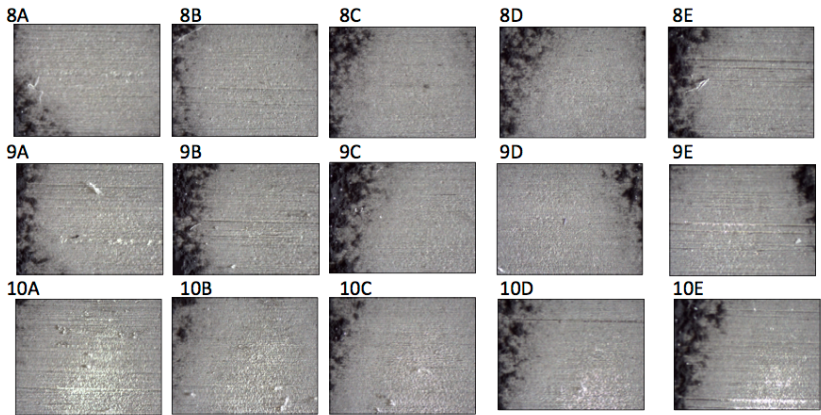
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

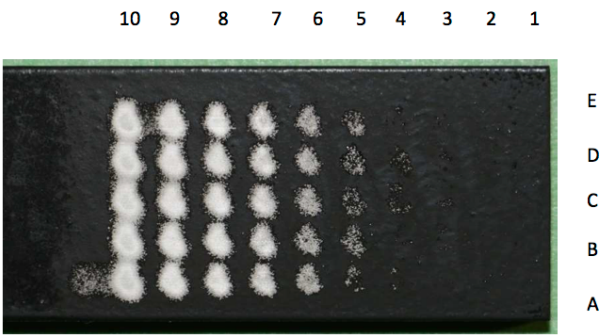




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



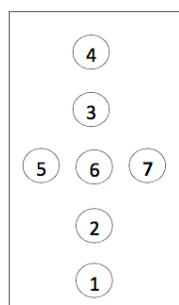
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	106	microns
2	132	microns
3	130	microns
4	132	microns
5	114	microns
6	124	microns
7	116	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

10-08-2016

Essai :

Essai 19

PARAMÈTRES

Fournisseur

Époxy à base d'eau

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_47

de la poutre

6 Lot2

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2288 \pm 132

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

15 \pm 1

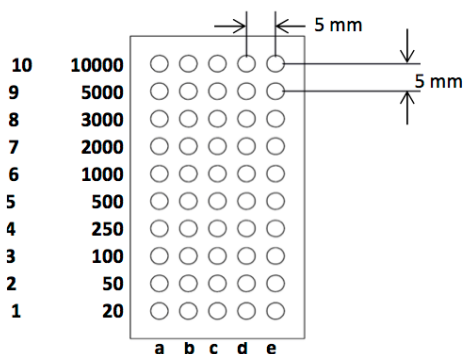
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

100

SCHÉMA DE L'ESSAI



Sites Érodés					
					10
					9
					8
					7
					6
					5
					4
					3
					2
					1
A	B	C	D	E	

NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

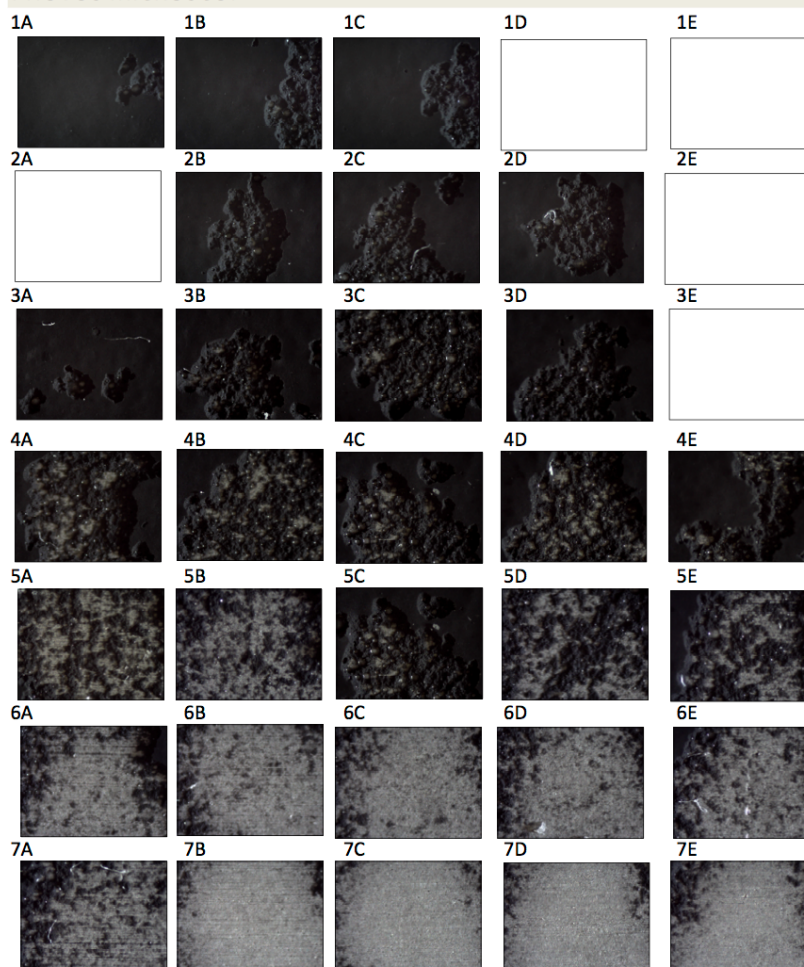
UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

1



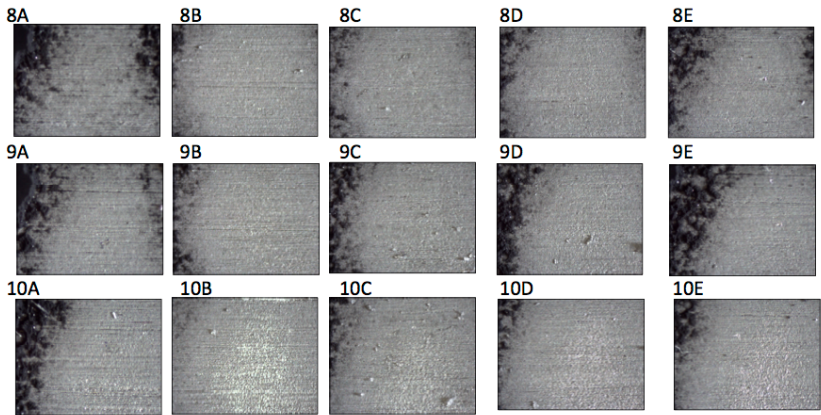
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

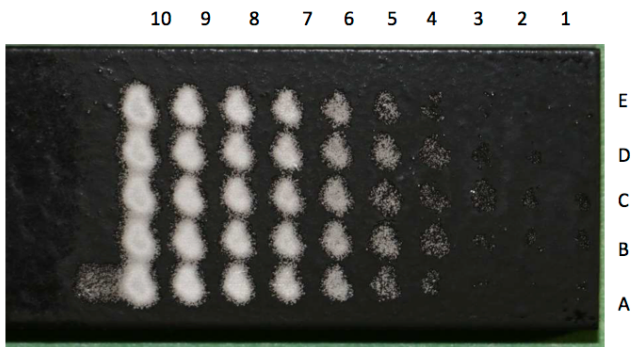




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



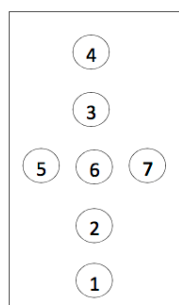
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	154	microns
2	114	microns
3	144	microns
4	152	microns
5	118	microns
6	132	microns
7	118	microns

A.2.4 Lotus Dry 123



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

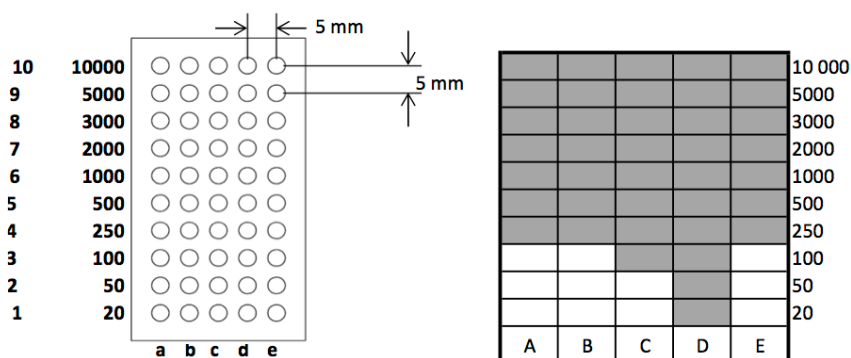
ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA): 22-04-2016
 # Essai : Essai 1

PARAMÈTRES

Fournisseur	Lotus Dry
Nom dossier pour calibration	Test_Erosion_6
# de la poutre	B740
Nombre d'impacts (départ)	20
Nombre d'impacts (fin)	10 000
Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)	2261,62 \pm 115,22
Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)	3,42 \pm 2,59
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)	00:48:32

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

UQAC
 UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
 À GROSBOIS

1



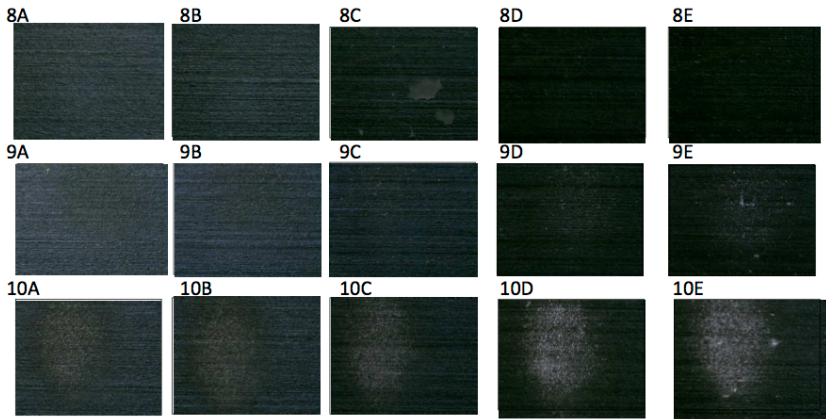
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

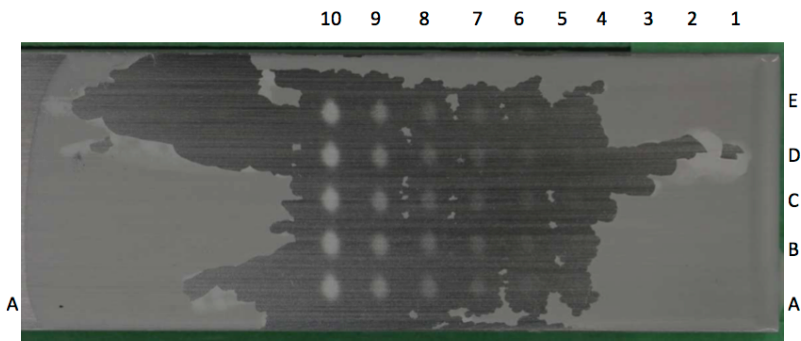




Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

12-07-2016

Essai :

Essai 11

PARAMÈTRES

Fournisseur

Lotus Dry

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_42

de la poutre

B741

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2290 \pm 129

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

12 \pm 2

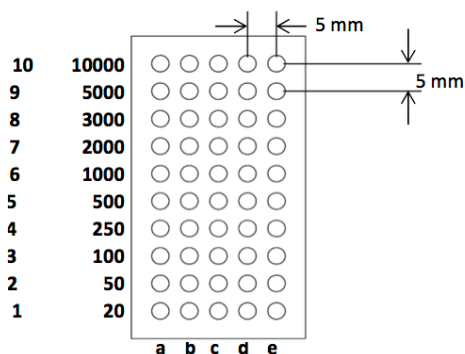
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

1000

SCHÉMA DE L'ESSAI



Sites Érodés					
					10
					9
					8
					7
					6
					5
					4
					3
					2
					1
A	B	C	D	E	

NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

1



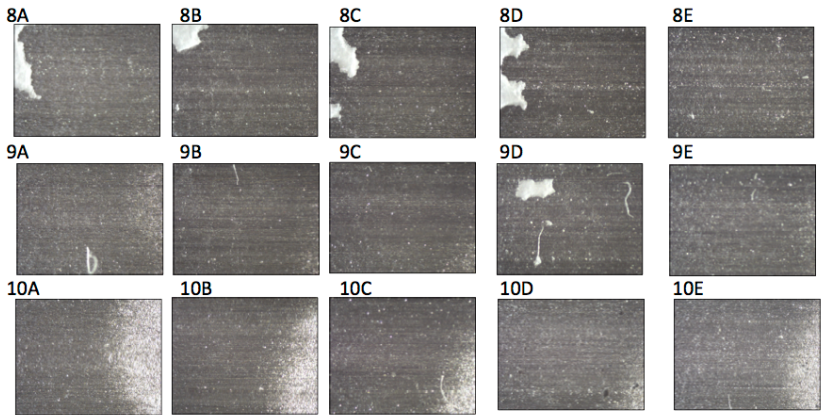
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

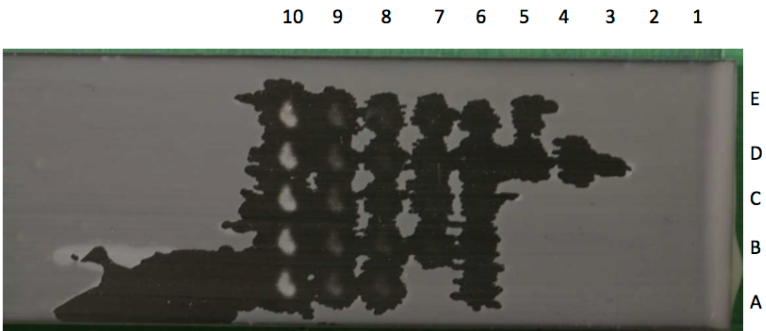
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	2E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



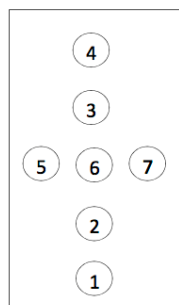
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	110	microns
2	94	microns
3	94	microns
4	78	microns
5	82	microns
6	96	microns
7	104	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

12-07-2016

Essai :

Essai 12

PARAMÈTRES

Fournisseur

Lotu Dry

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_42

de la poutre

B

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2290 \pm 129

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

12 \pm 2

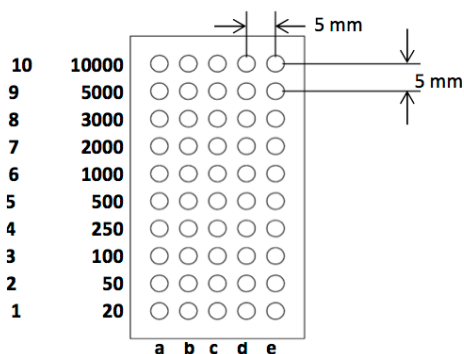
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

1000

SCHÉMA DE L'ESSAI



Sites Érodés

					10
					9
					8
					7
					6
					5
					4
					3
					2
					1
A	B	C	D	E	

NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



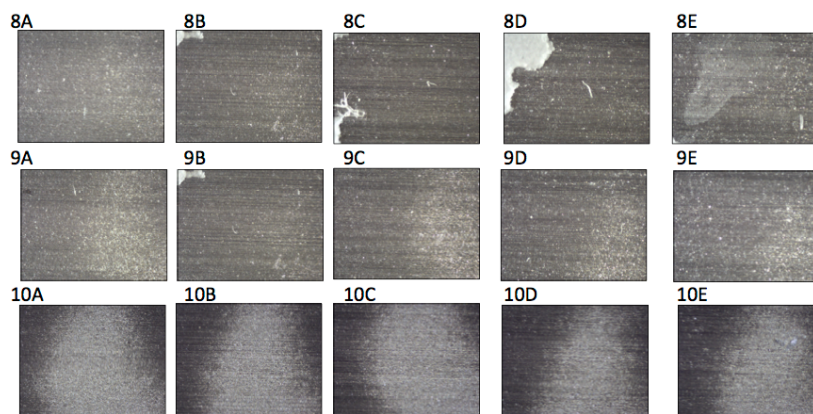
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

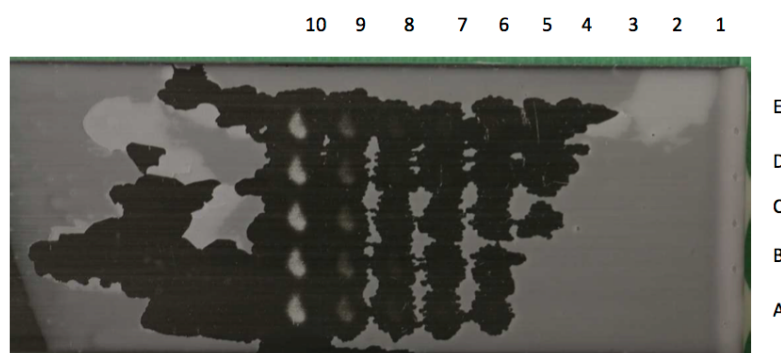
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	2E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



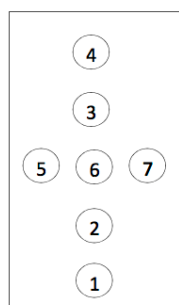
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	112	microns
2	98	microns
3	92	microns
4	82	microns
5	88	microns
6	98	microns
7	94	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

30-01-2017

Essai :

Essai 38

PARAMÈTRES

Fournisseur

Lotus dry

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_56

de la poutre

B745

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2280 \pm 131

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

6 \pm 5

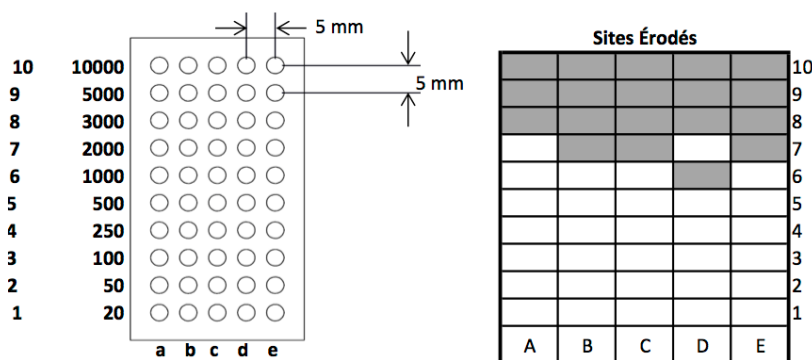
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:32

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

3000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



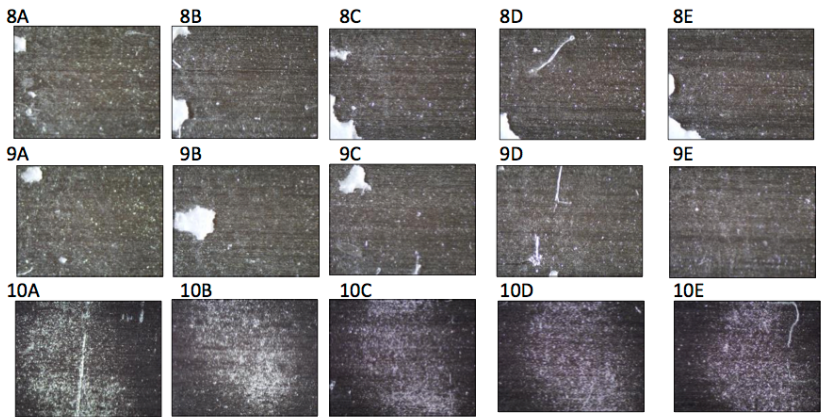
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

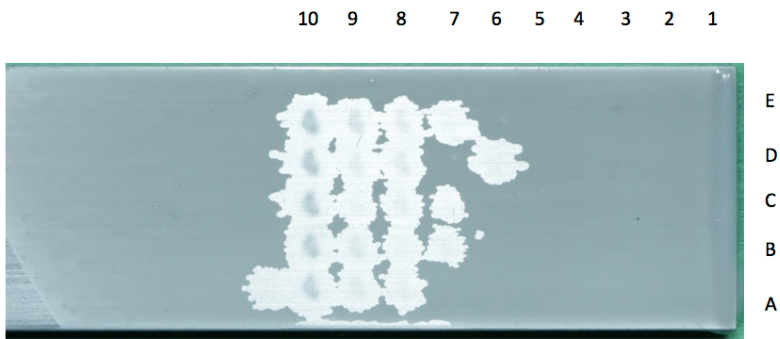
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	2E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



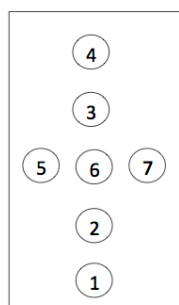
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	114	microns
2	108	microns
3	94	microns
4	88	microns
5	100	microns
6	106	microns
7	108	microns

A.2.5 Hydrophobic 1



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

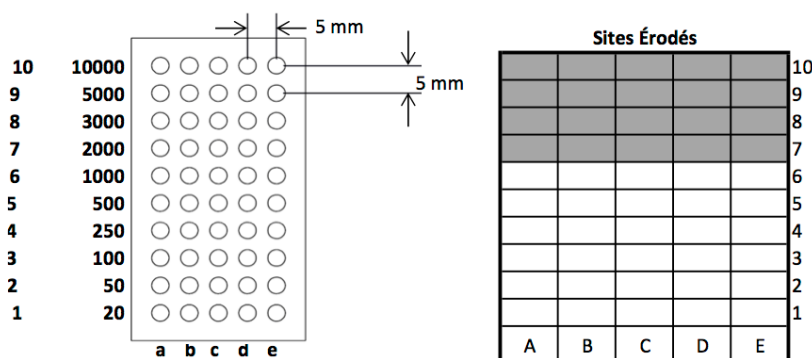
ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA): 29-08-2016
Essai : Essai 20

PARAMÈTRES

Fournisseur	New Hydrophobic solgel labo 127SL27
Nom dossier pour calibration	Test_Erosion_49
# de la poutre	B856
Nombre d'impacts (départ)	20
Nombre d'impacts (fin)	10 000
Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)	2284 \pm 130
Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)	16 \pm 1
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)	00:48:31
Nombre d'impacts (apparition de dommages)	2000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:



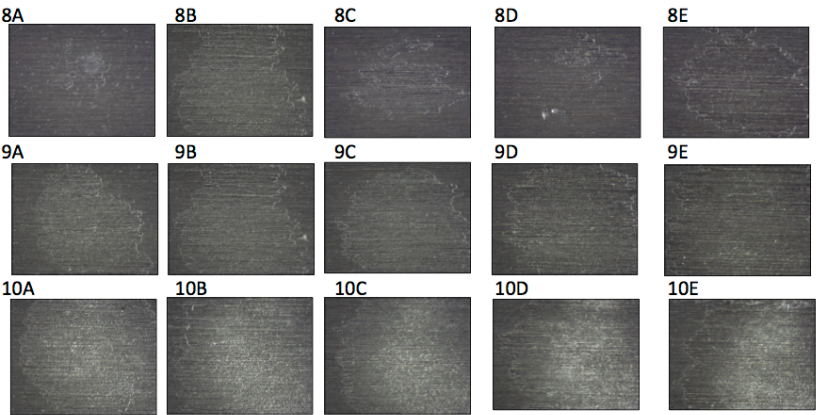
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

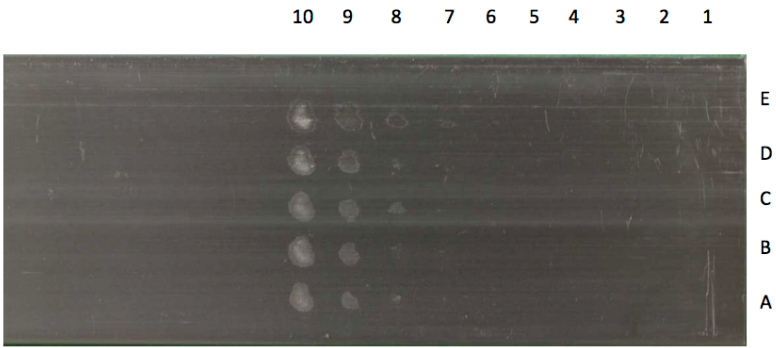
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	2E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



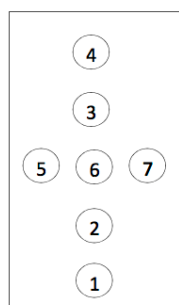
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	15	microns
2	21	microns
3	12	microns
4	11	microns
5	7	microns
6	12	microns
7	10	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

29-08-2016

Essai :

Essai 21

PARAMÈTRES

Fournisseur

New hydrophobic solgel labo 127SL27

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_49

de la poutre

B858

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2284 \pm 130

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 1

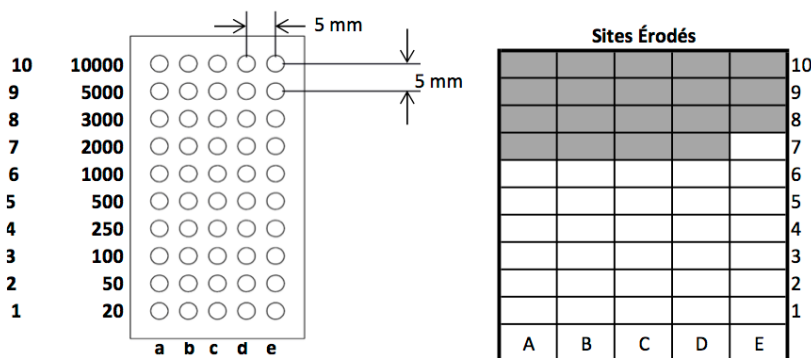
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

2000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



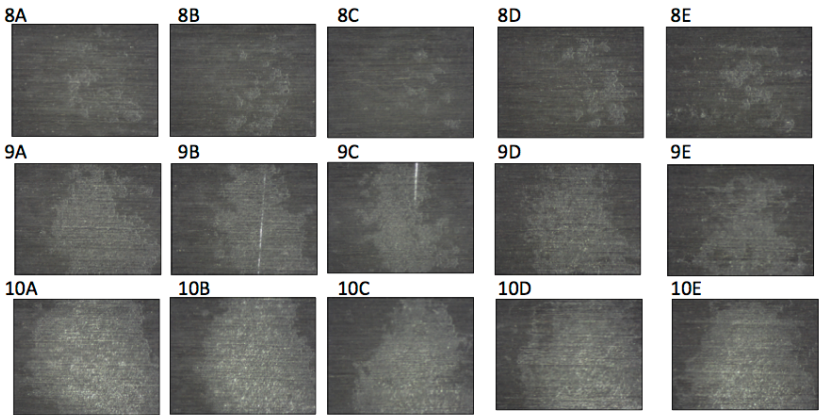
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

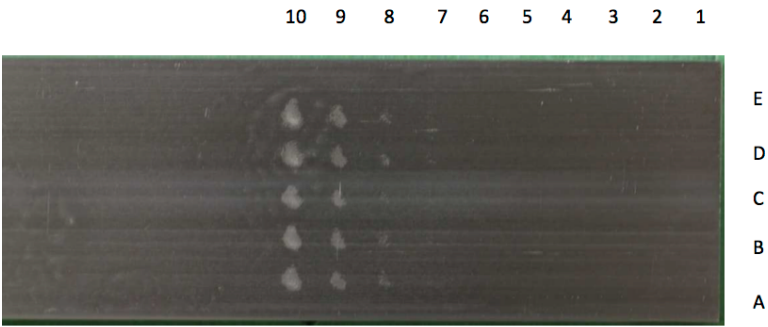
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	2E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



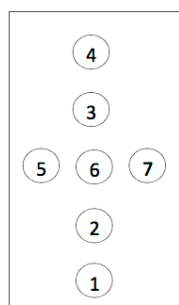
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	13	microns
2	10	microns
3	19	microns
4	9	microns
5	7	microns
6	9	microns
7	5	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

29-08-2016

Essai :

Essai 22

PARAMÈTRES

Fournisseur

New hydrophobic solgel labo 127SL27

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_49

de la poutre

B859

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2282 \pm 128

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 1

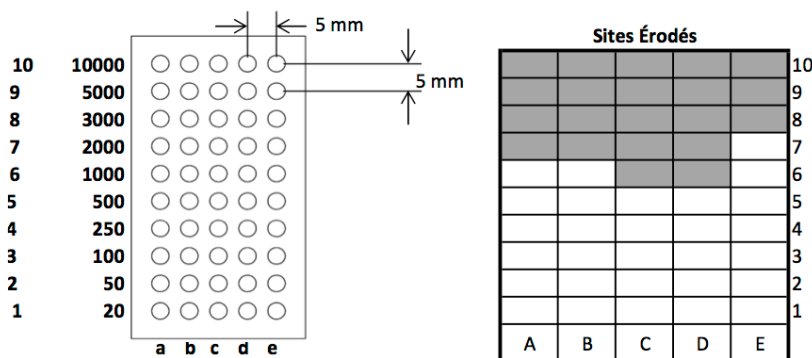
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

2000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



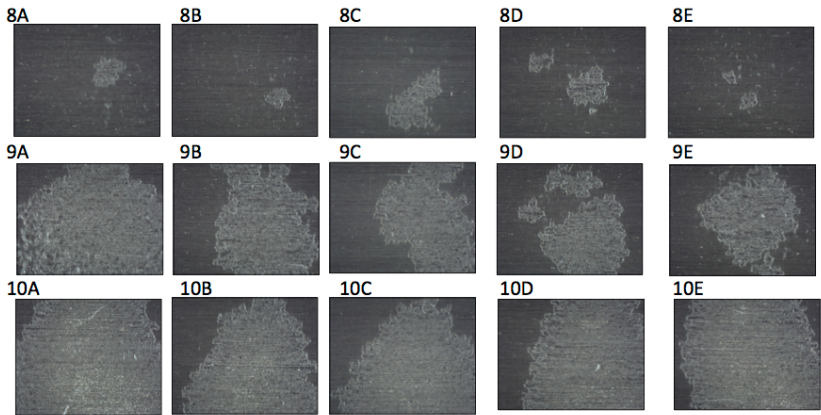
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

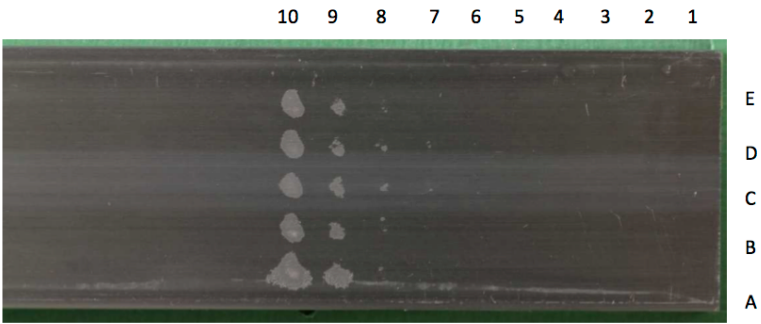
1A	1B	1C	1D	1E
2A	2B	2C	2D	2E
3A	3B	3C	3D	3E
4A	4B	4C	4D	4E
5A	5B	5C	5D	5E
6A	6B	6C	6D	6E
7A	7B	7C	7D	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



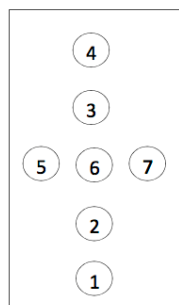
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	22	microns
2	25	microns
3	22	microns
4	24	microns
5	20	microns
6	24	microns
7	19	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

30-08-2016

Essai :

Essai 23

PARAMÈTRES

Fournisseur

New Hydrophobic solgel Labo 127SL27

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_50

de la poutre

B860

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2281 \pm 131

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 2

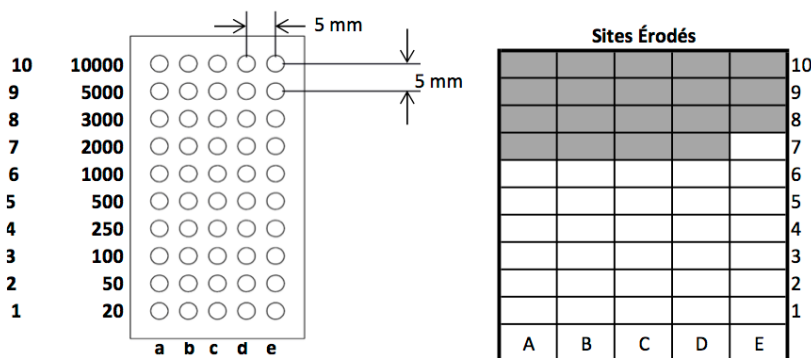
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

2000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



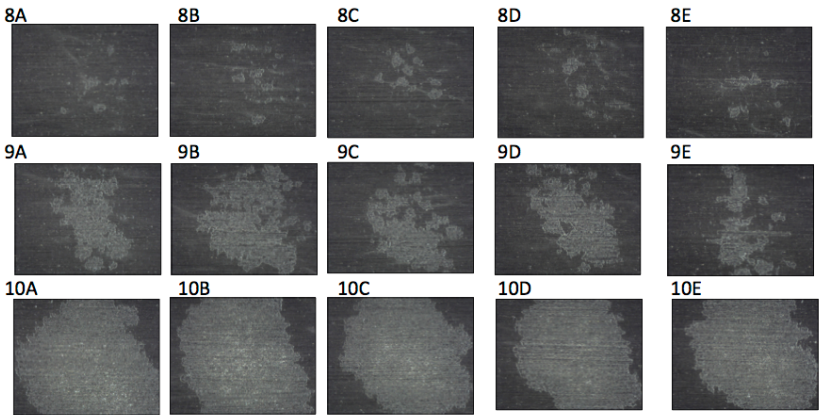
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

1A	1B	1C	1D	1E
2A	2B	2C	2D	2E
3A	3B	3C	3D	3E
4A	4B	4C	4D	4E
5A	5B	5C	5D	5E
6A	6B	6C	6D	6E
7A	7B	7C	7D	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



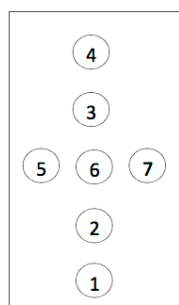
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	13	microns
2	9	microns
3	8	microns
4	10	microns
5	8	microns
6	6	microns
7	12	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

30-08-2016

Essai :

Essai 24

PARAMÈTRES

Fournisseur

New Hydrophobic Solgel Labo 127SL27

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_50

de la poutre

B861

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2283 \pm 127

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

15 \pm 1

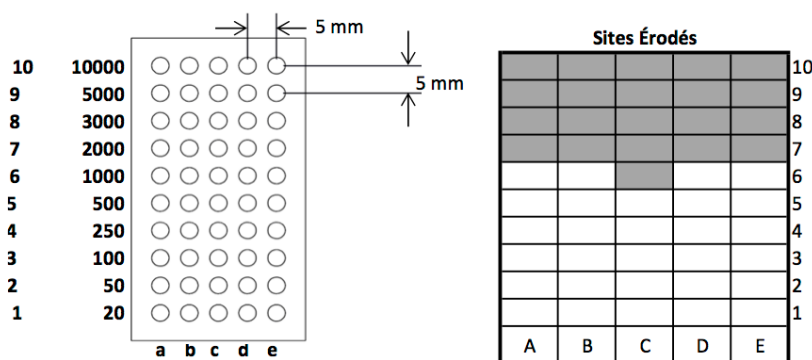
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

2000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



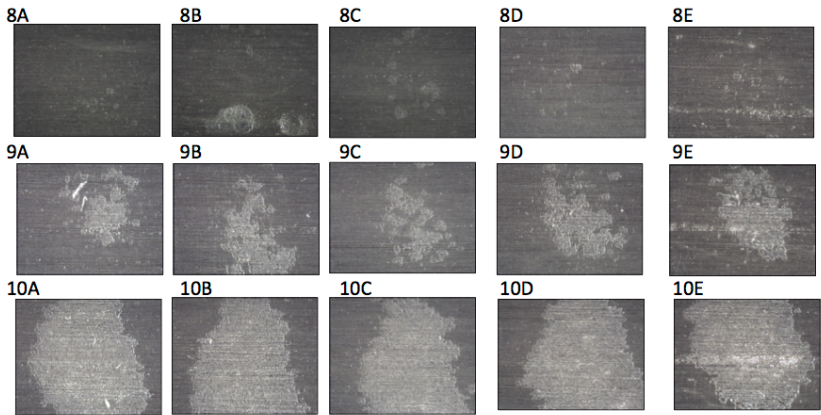
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

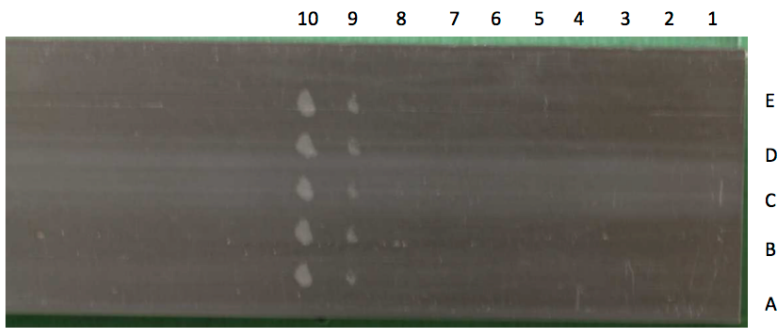
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	2E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



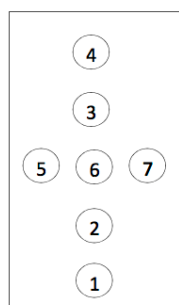
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	9	microns
2	16	microns
3	18	microns
4	19	microns
5	13	microns
6	14	microns
7	17	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

30-08-2016

Essai :

Essai 25

PARAMÈTRES

Fournisseur

New Hydrophobic Solgel Labo 127SL27

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_50

de la poutre

B862

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2281 \pm 126

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 1

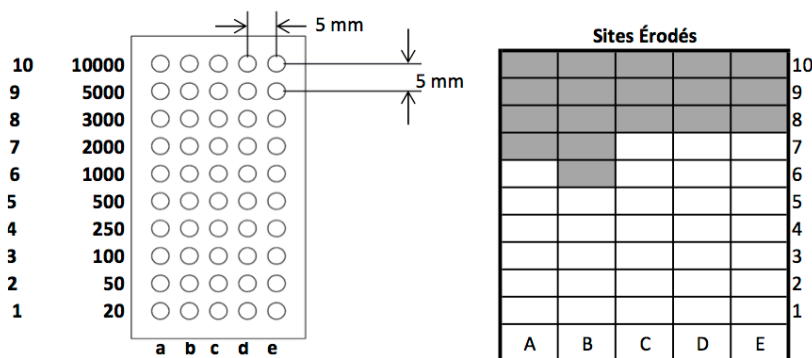
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

3000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016

UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

1



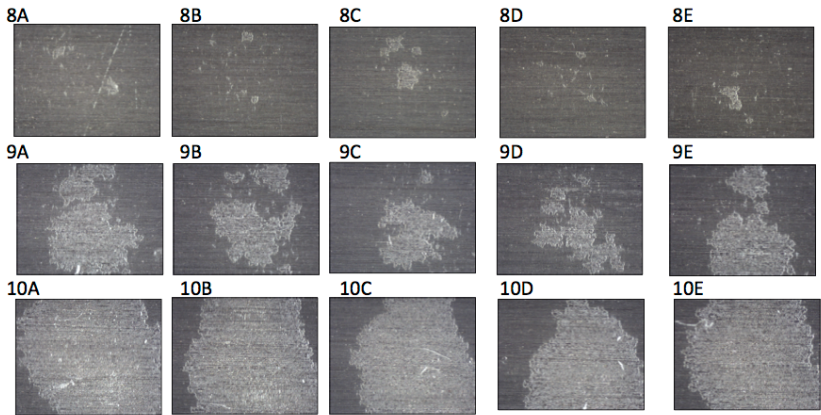
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	2E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



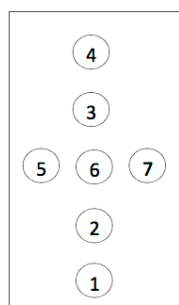
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	20	microns
2	16	microns
3	18	microns
4	19	microns
5	13	microns
6	14	microns
7	17	microns

A.2.6 Hydrophobic 2

(La page deux (2) des fiches n'a pas été insérée, car il n'y avait pas d'érosion)



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

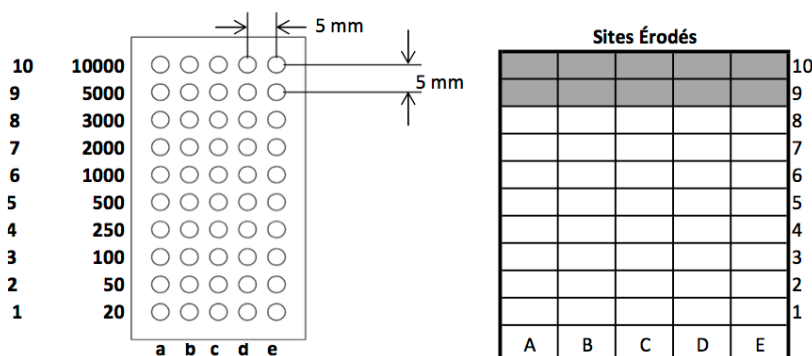
ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA): 30-08-2016
 # Essai : Essai 26

PARAMÈTRES

Fournisseur: New Hydrophobic Socogel Labo 137AE110
 Nom dossier pour calibration: Test_Erosion_50
 # de la poutre: B914
 Nombre d'impacts (départ): 20
 Nombre d'impacts (fin): 10 000
 Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi): 2281 ± 127
 Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C): 16 ± 1
 Durée de l'essai (heures:minutes:secondes): 00:48:31
 Nombre d'impacts (apparition de dommages): 5000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

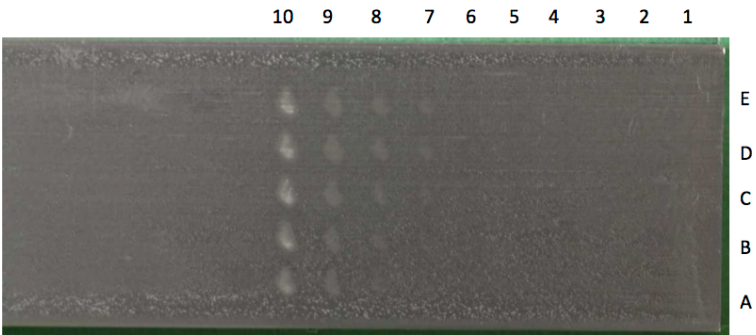
Crée le 14-04-2016



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A	8B	8C	8D	8E
9A	9B	9C	9D	9E
10A	10B	10C	10D	10E

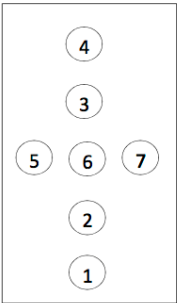
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	2	microns
2	1	microns
3	3	microns
4	4	microns
5	1	microns
6	6	microns
7	2	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

30-08-2016

Essai :

Essai 27

PARAMÈTRES

Fournisseur

New Hydrophobic Socogel Labo 137AE110

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_50

de la poutre

B911

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2281 \pm 126

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 1

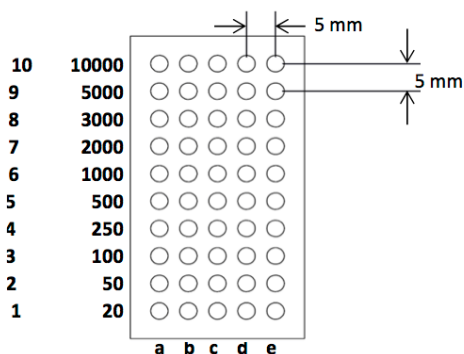
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

5000

SCHÉMA DE L'ESSAI



Sites Érodés					
					10
					9
					8
					7
					6
					5
					4
					3
					2
					1
A	B	C	D	E	

NOTE SUR L'ESSAI

Note:

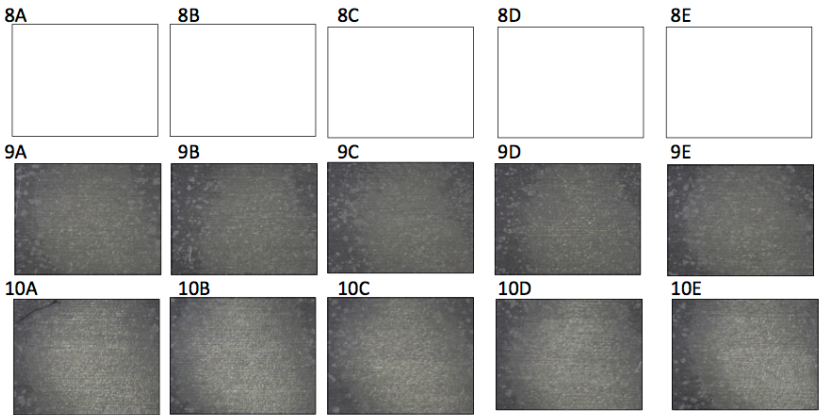
Crée le 14-04-2016

UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

1



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



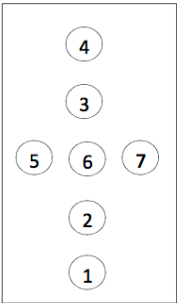
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	6	microns
2	4	microns
3	6	microns
4	6	microns
5	1	microns
6	5	microns
7	1	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

30-08-2016

Essai :

Essai 28

PARAMÈTRES

Fournisseur

New Hydrophobic Socogel Labo 137AE110

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_50

de la poutre

B918

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2280 \pm 125

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 1

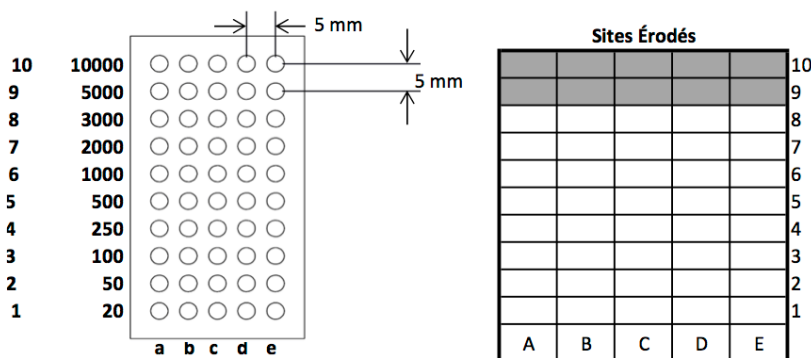
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

5000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

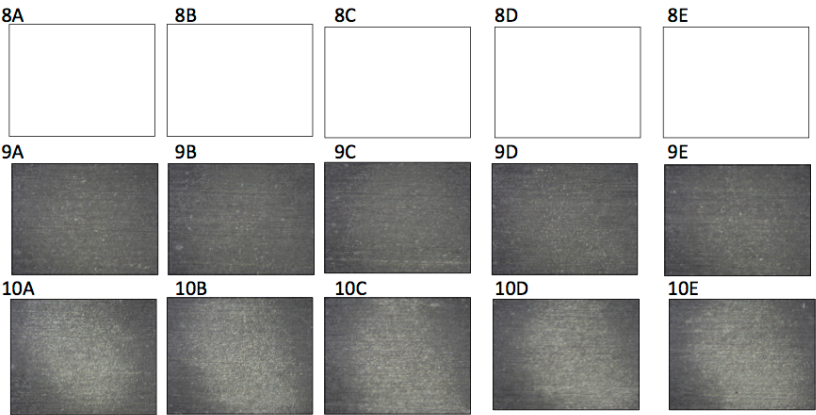
Crée le 14-04-2016

UQAC
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
À CHICOUTY

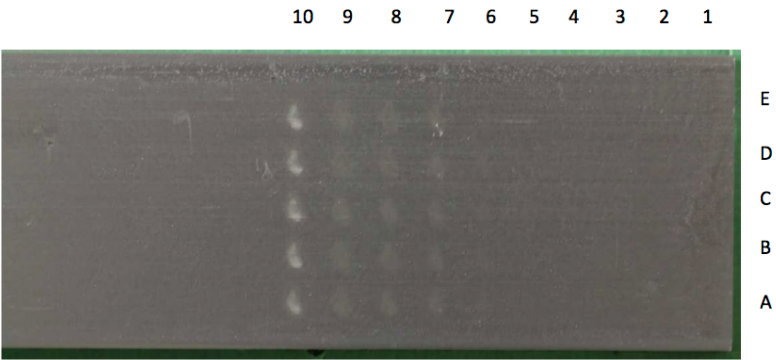
1



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



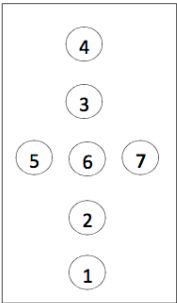
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	3	microns
2	4	microns
3	1	microns
4	2	microns
5	5	microns
6	1	microns
7	2	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

30-08-2016

Essai :

Essai 29

PARAMÈTRES

Fournisseur

New Hydrophobic Socogel Labo 137AE110

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_50

de la poutre

B899

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2279 \pm 125

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 1

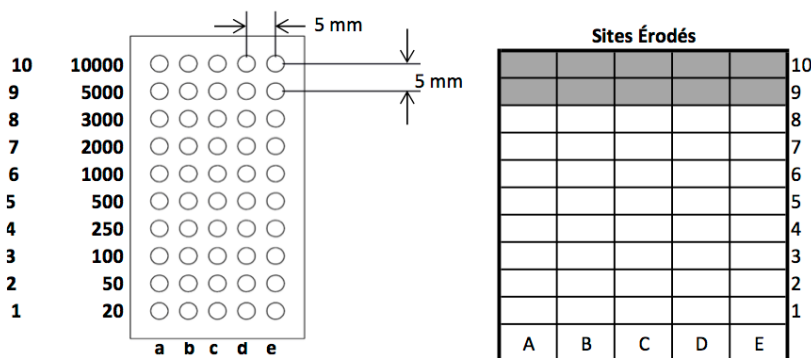
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

5000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

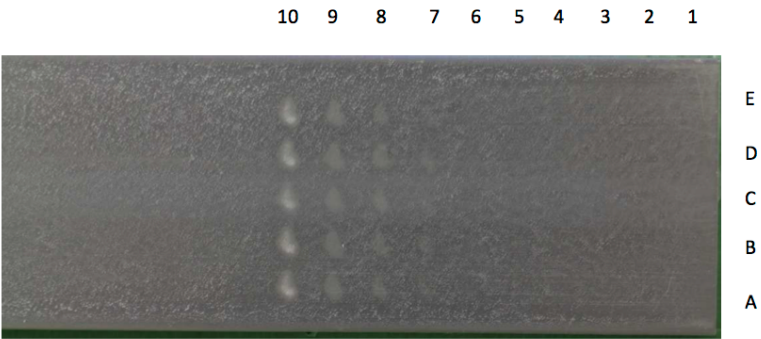
Crée le 14-04-2016



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A	8B	8C	8D	8E
9A	9B	9C	9D	9E
10A	10B	10C	10D	10E

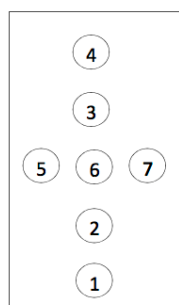
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	4	microns
2	2	microns
3	3	microns
4	4	microns
5	1	microns
6	3	microns
7	2	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

31-08-2016

Essai :

Essai 30

PARAMÈTRES

Fournisseur

New Hydrophobic Socogel Labo 137AE110

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_51

de la poutre

B919

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2283 \pm 127

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

15 \pm 2

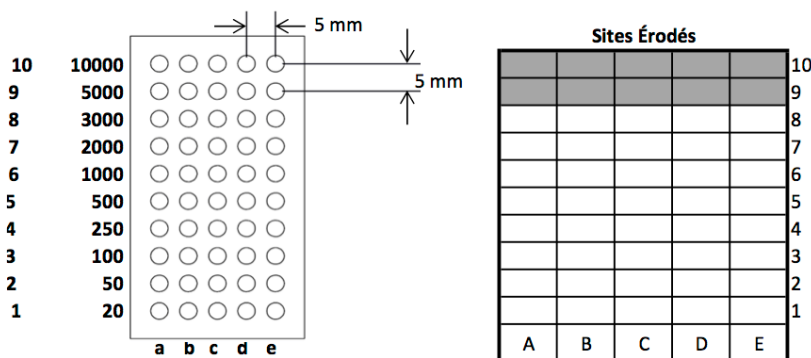
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

5000

SCHÉMA DE L'ESSAI



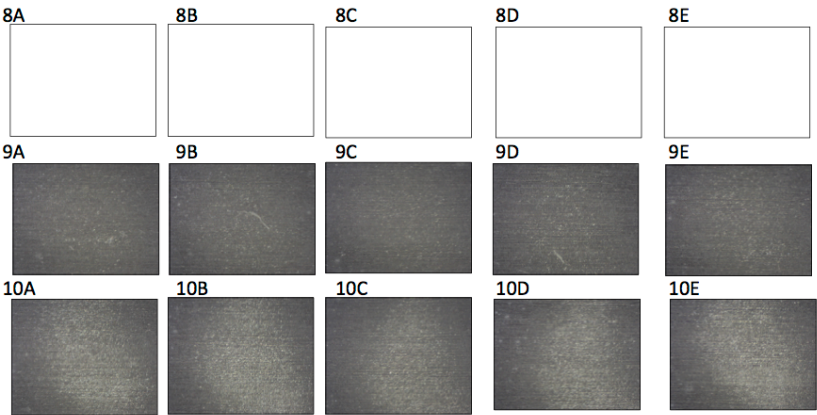
NOTE SUR L'ESSAI

Note:

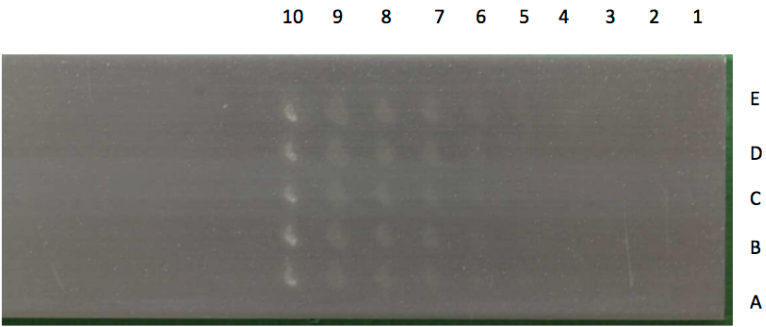
Crée le 14-04-2016



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



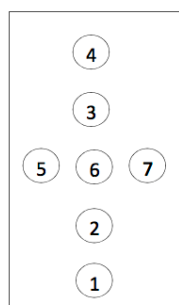
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	4	microns
2	3	microns
3	3	microns
4	2	microns
5	1	microns
6	3	microns
7	2	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

31-08-2016

Essai :

Essai 31

PARAMÈTRES

Fournisseur

New Hydrophobic Socogel Labo 137AE110

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_51

de la poutre

B897

Nombre d'impacts (départ)

20

Nombre d'impacts (fin)

10 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2285 \pm 129

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

15 \pm 1

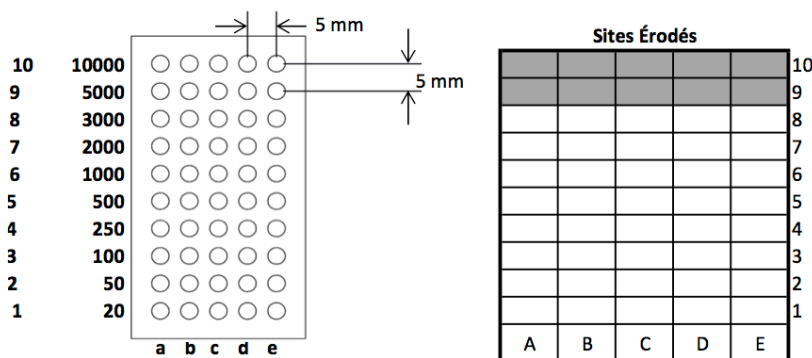
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

00:48:31

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

5000

SCHÉMA DE L'ESSAI



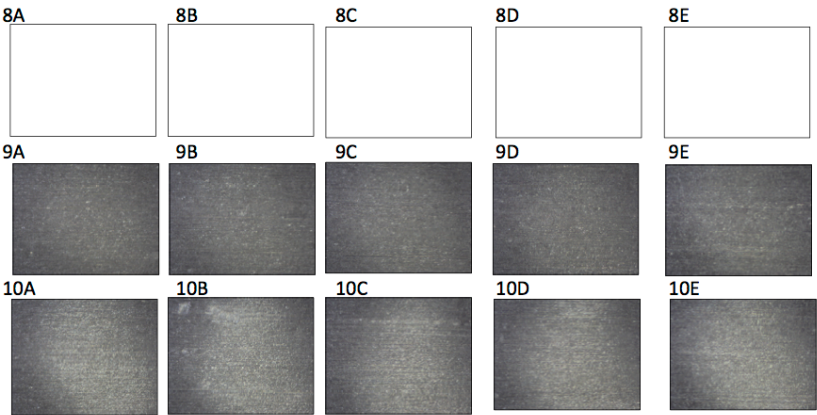
NOTE SUR L'ESSAI

Note:

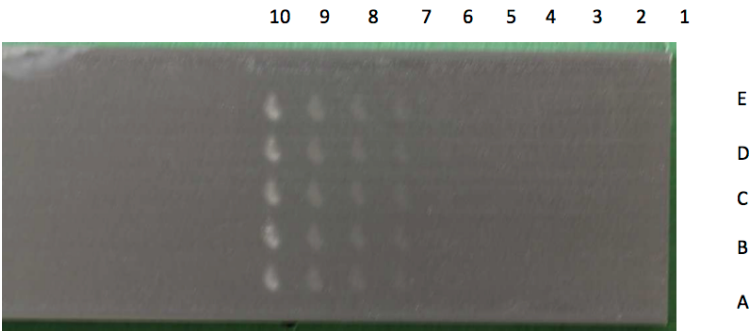
Crée le 14-04-2016



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)



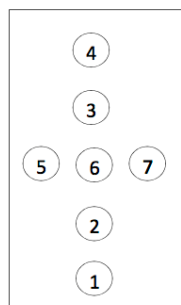
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	2	microns
2	1	microns
3	3	microns
4	2	microns
5	1	microns
6	1	microns
7	2	microns

A.2.7 Anti-Erosion 1



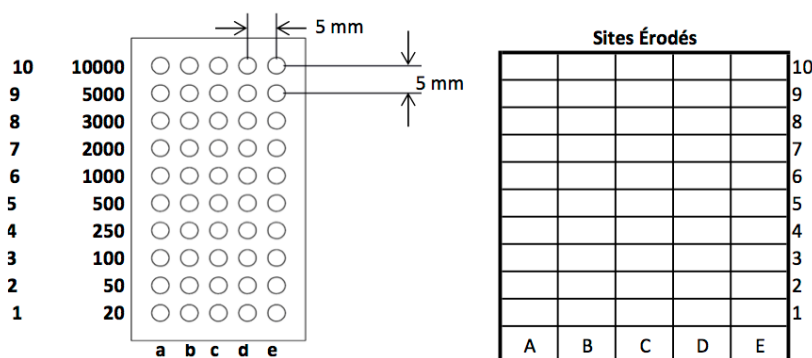
Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA): 31-08-2016
 # Essai : Essai 32

PARAMÈTRES

Fournisseur	Anti-Erosion Solgel Labo 070X215
Nom dossier pour calibration	Test_Erosion_51
# de la poutre	B842
Nombre d'impacts (départ)	20
Nombre d'impacts (fin)	10 000
Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)	2281 \pm 127
Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)	16 \pm 1
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)	00:48:31
Nombre d'impacts (apparition de dommages)	Aucune Érosion

SCHÉMA DE L'ESSAI**NOTE SUR L'ESSAI**

Note:

Crée le 14-04-2016

1



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

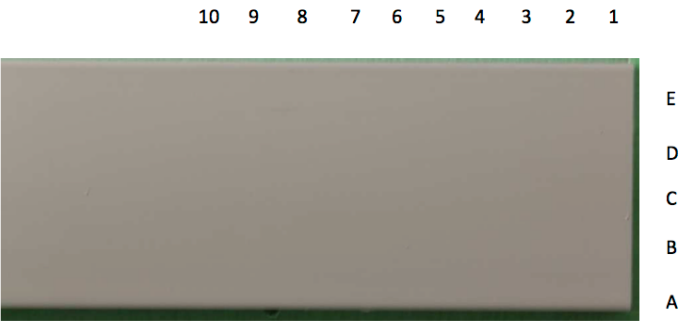
1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	2E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A	8B	8C	8D	8E
<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>
9A	9B	9C	9D	9E
<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>
10A	10B	10C	10D	10E
<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>

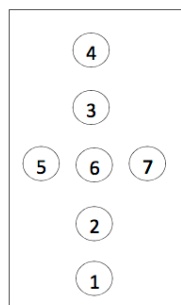
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	7	microns
2	5	microns
3	5	microns
4	8	microns
5	10	microns
6	9	microns
7	12	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

01-09-2016

Essai :

Essai 33

PARAMÈTRES

Fournisseur

Anti-Erosion Solgel Labo 070X215

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_51

de la poutre

B938

Nombre d'impacts (départ)

20 000

Nombre d'impacts (fin)

50 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2288 \pm 110

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 1

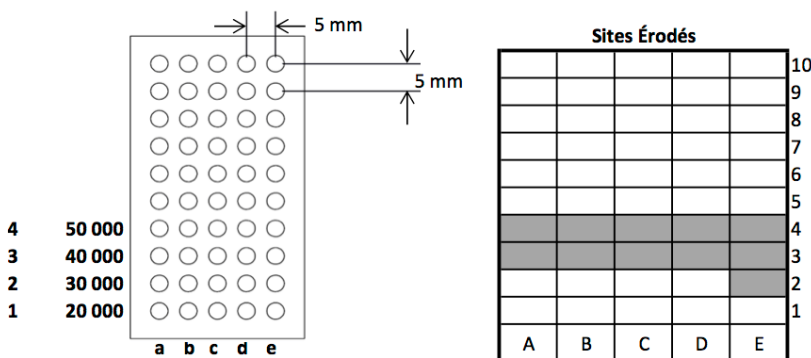
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

04:53:05

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

40 000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

1A	1B	1C	1D	1E
2A	2B	2C	2D	2E
3A	3B	3C	3D	3E
4A	4B	4C	4D	4E
5A	5B	5C	5D	5E
6A	6B	6C	6D	6E
7A	7B	7C	7D	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A	8B	8C	8D	8E
<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>
9A	9B	9C	9D	9E
<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>
10A	10B	10C	10D	10E
<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>

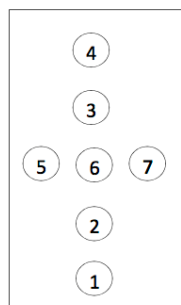
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	18	microns
2	19	microns
3	16	microns
4	14	microns
5	12	microns
6	15	microns
7	13	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

02-09-2016

Essai :

Essai 34

PARAMÈTRES

Fournisseur

Anti-Erosion Solgel Labo 070X215

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_52

de la poutre

B865

Nombre d'impacts (départ)

20 000

Nombre d'impacts (fin)

50 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2295 \pm 104

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 1

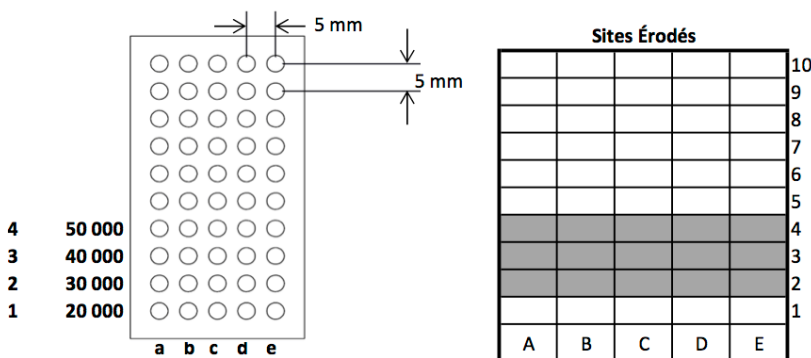
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

04:53:05

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

30 000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

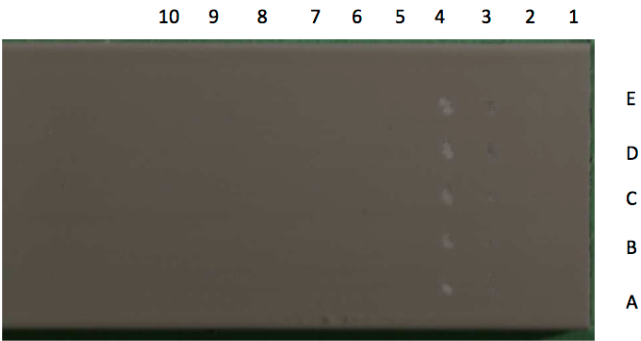
1A	1B	1C	1D	1E
2A	2B	2C	2D	2E
3A	3B	3C	3D	3E
4A	4B	4C	4D	4E
5A	5B	5C	5D	5E
6A	6B	6C	6D	6E
7A	7B	7C	7D	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A	8B	8C	8D	8E
9A	9B	9C	9D	9E
10A	10B	10C	10D	10E

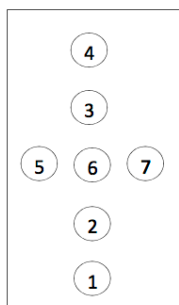
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	7	microns
2	9	microns
3	8	microns
4	8	microns
5	8	microns
6	9	microns
7	9	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

06-09-2016

Essai :

Essai 35

PARAMÈTRES

Fournisseur

Anti-Erosion Solgel Labo 070X215

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_53

de la poutre

B910

Nombre d'impacts (départ)

20 000

Nombre d'impacts (fin)

40 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2284 \pm 113

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

15 \pm 1

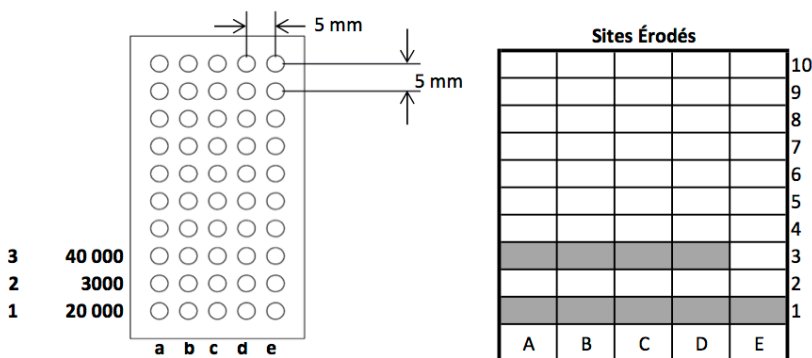
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

02:05:30

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

20 000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

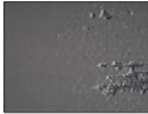
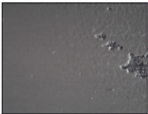
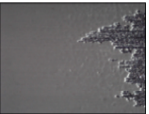
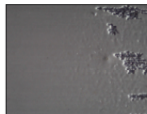
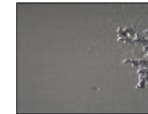






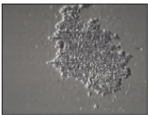
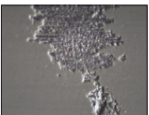
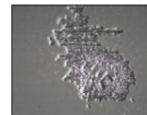

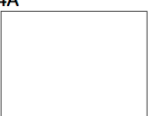
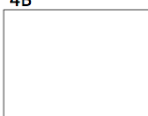
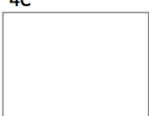
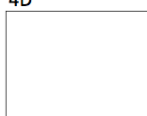
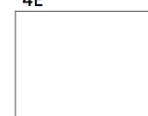

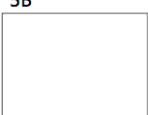
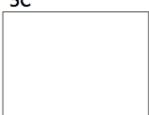
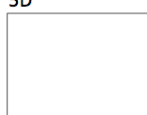
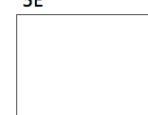
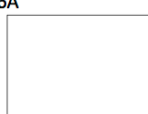
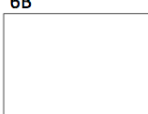
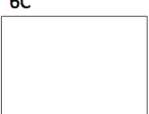
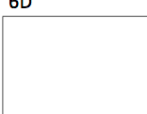
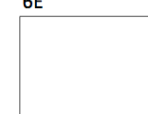

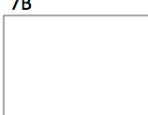
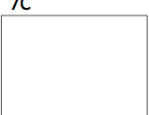
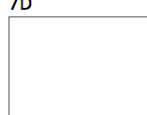
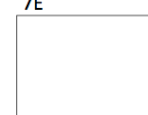
Note:

Crée le 14-04-2016



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

1A 	1B 	1C 	1D 	1E 
2A 	2B 	2C 	2D 	2E 
3A 	3B 	3C 	3D 	3E 
4A 	4B 	4C 	4D 	4E 
5A 	5B 	5C 	5D 	5E 
6A 	6B 	6C 	6D 	6E 
7A 	7B 	7C 	7D 	7E 



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A	8B	8C	8D	8E
9A	9B	9C	9D	9E
10A	10B	10C	10D	10E

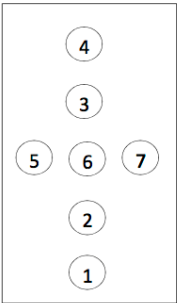
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	8	microns
2	13	microns
3	17	microns
4	18	microns
5	15	microns
6	18	microns
7	17	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

06-09-2016

Essai :

Essai 36

PARAMÈTRES

Fournisseur

Anti-Erosion Solgel Labo 070X215

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_54

de la poutre

B904

Nombre d'impacts (départ)

20 000

Nombre d'impacts (fin)

40 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2287 \pm 109

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 1

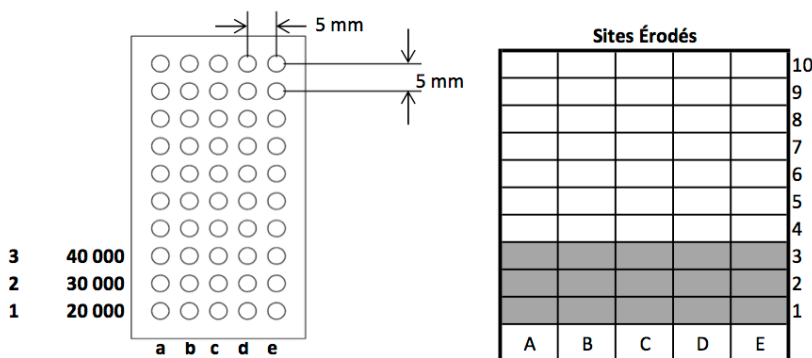
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

03:08:20

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

20 000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

1A 	1B 	1C 	1D 	1E
2A 	2B 	2C 	2D 	2E
3A 	3B 	3C 	3D 	3E
4A 	4B 	4C 	4D 	4E
5A 	5B 	5C 	5D 	5E
6A 	6B 	6C 	6D 	6E
7A 	7B 	7C 	7D 	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A	8B	8C	8D	8E
9A	9B	9C	9D	9E
10A	10B	10C	10D	10E

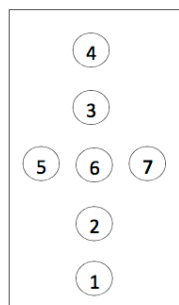
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	10	microns
2	14	microns
3	13	microns
4	14	microns
5	12	microns
6	14	microns
7	14	microns



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

ESSAI

Date (JJ-MM-AAAA):

07-09-2016

Essai :

Essai 37

PARAMÈTRES

Fournisseur

Anti-Erosion Solgel Labo 070X215

Nom dossier pour calibration

Test_Erosion_55

de la poutre

B935

Nombre d'impacts (départ)

10 000

Nombre d'impacts (fin)

40 000

Pression d'eau : moyenne \pm écart-type (Psi)

2288 \pm 103

Température de l'eau: Moyenne \pm écart-type (°C)

16 \pm 1

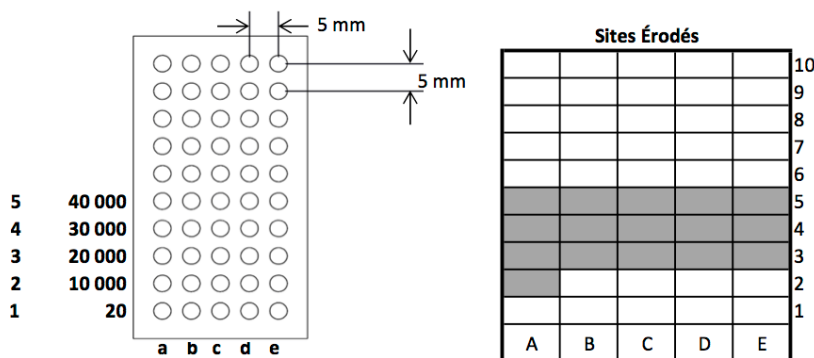
Durée de l'essai (heures:minutes:secondes)

03:40:09

Nombre d'impacts (apparition de dommages)

20 000

SCHÉMA DE L'ESSAI



NOTE SUR L'ESSAI

Note:

Crée le 14-04-2016



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

PHOTOS MICROSCOPE

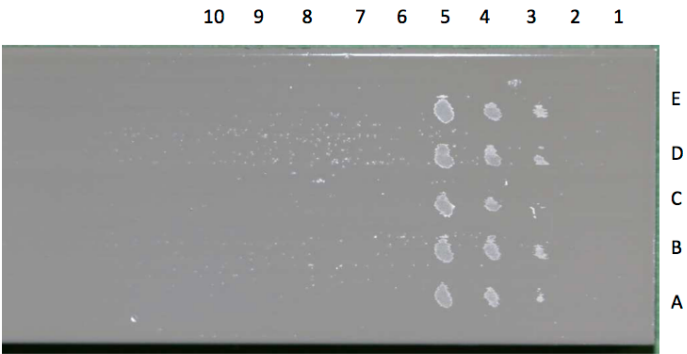
1A	1B	1C	1D	1E
2A	2B	2C	2D	2E
3A	3B	3C	3D	3E
4A	4B	4C	4D	4E
5A	5B	5C	5D	5E
6A	6B	6C	6D	6E
7A	7B	7C	7D	7E



Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

8A	8B	8C	8D	8E
9A	9B	9C	9D	9E
10A	10B	10C	10D	10E

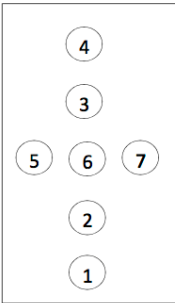
PHOTOS CAMÉRA CANON





Feuille d'essai Érosion par la Pluie (Rain Erosion)

MESURE DE L'ÉPAISSEUR



1	8	microns
2	7	microns
3	8	microns
4	6	microns
5	8	microns
6	7	microns
7	9	microns